

Б - 19

4-80-409

БАКАЛОВ

Димитър Димитров

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ
И ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СТРУКТУРЫ ЯДЕР
В ОПИСАНИИ μ -МЕЗОАТОМОВ
И μ -МЕЗОМОЛЕКУЛ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук

Л. И. ПОНОМАРЕВ

доктор физико-математических наук
академик АН НРБ

И. Т. ТОДОРОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

С. С. ГЕРШГЕЙН

доктор физико-математических наук

Р. Н. ФАУСТОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ленинградский Институт ядерной физики им. Б. П. Константинова.

Защита диссертации состоится "1" сентября 1980 года на заседании Специализированного совета К047.01.01 при Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская обл., г. Дубна).

Автореферат разослан "26" августа 1980 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В. И. КУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В последние годы процессы, происходящие при торможении и остановке μ^- -мезонов в смеси изотопов водорода, являются предметом многих экспериментальных и теоретических исследований^{/1,2,3/}. Большое внимание уделяется изучению процессов слабого захвата μ^- -мезонов ядрами, измерение скорости которых представляется важным источником информации о слабых взаимодействиях μ^- -мезонов с протонами и о структуре дейтрона^{/3,4/}. В настоящее время, в связи с усилением интереса к явлению μ^- -катализа синтеза ядер изотопов водорода^{/1,5/}, интенсивно стали изучаться также процессы резонансного образования мезомолекул $dd\mu$ и $dt\mu$ ^{/6,7,8/}.

Для описания этих процессов необходимо вычислить с высокой точностью ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ эВ) энергию связи и волновые функции стационарных состояний μ^- -мезомолекул и основного состояния μ^- -мезоатомов изотопов водорода^{/2,6/}.

В большинстве проведенных до сих пор расчетах^{/2/} μ^- -мезомолекулы рассматривались как связанные состояния точечных бесспиновых ядер и μ^- -мезона, взаимодействующих по закону Кулона. Точность определения уровней энергии мезомолекул при таком подходе, однако, недостаточна; более того, он не позволяет получить информацию о спиновых свойствах мезомолекул, от которых сильно зависит скорость процесса захвата μ^- -мезона ядрами мезомолекул^{/3,4/}. По результатам немногочисленных работ, посвященных изучению эффектов поляризации вакуума в мезоатомах и мезомолекулах^{/9/} и сверхтонкой структуры уровней энергии мезомолекул $pd\mu$ ^{/1/} и $pp\mu$ ^{/10,11/}, можно сделать вывод, что учет релятивистских (в том числе спиновых) эффектов в электромагнитном (э.-м.) взаимодействии ядер и μ^- -мезонов весьма существенен для объяснения экспериментально наблюдаемых скоростей процессов μ^- -захвата в смеси водорода и дейтерия^{/3,4/} и резонансного образования мезомолекул $dt\mu$ ^{/8/} и $dd\mu$ ^{/7/}. Однако в этих работах была учтена лишь часть эффектов релятивистской динамики, а эффектами э.-м. структуры ядер полностью пренебрегалось; кроме того, точность вычислений была ограничена использованными вычислительными алгоритмами^{/12/}.

Для надежной интерпретации экспериментальных результатов^{/3,4,7,8/} описание μ^- -мезомолекул и μ^- -мезоатомов изотопов водорода должно быть проведено в рамках последовательной реляти-

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

вистской формулировки задач двух и трех частиц с э.-м. взаимодействием; нужно также иметь алгоритмы, которые обеспечивают точность вычисления уровней энергии мезомолекул не хуже, чем $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Основная цель работы состояла в том, чтобы развить метод последовательного релятивистского описания связанных состояний систем двух и трех спиновых частиц с э.-м. взаимодействием и вычислить с его помощью сверхтонкую структуру уровней энергии, энергию связи и волновые функции стационарных состояний мезомолекул и мезоатомов изотопов водорода с точностью, достаточной для объяснения экспериментальных результатов по резонансному образованию мезомолекул и слабого μ^- -захвата в смеси изотопов водорода.

Научная новизна и практическая ценность. В данной диссертации, в рамках адиабатического подхода^{/13/}, впервые сформулирована и решена задача о связанных состояниях системы трех релятивистских спиновых частиц с э.-м. взаимодействием.

Развитый в диссертации общий метод применен для вычисления релятивистских и связанных с э.-м. структурой ядер поправок к нерелятивистским значениям энергии связи μ^- -мезомолекул изотопов водорода с точностью ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ эВ), достаточной для количественного объяснения экспериментов по изучению резонансного образования мезомолекул $d\mu^-$ ^{/8/} и $dd\mu^-$ ^{/7/}. С точностью $\sim 10^{-3}$ построены также релятивистские волновые функции стационарных состояний мезомолекул, вычислена их заселенность и соответствующие значения γ -факторов^{/10,11/} и получены выражения для скорости процесса μ^- -захвата ядрами мезомолекул через скорости того же процесса в мезоатомах, необходимые для интерпретации экспериментальных результатов по ядерному μ^- -захвату в смеси изотопов водорода^{/3,4,10/}.

Описание μ^- -мезоатомов проведено в рамках квазипотенциального подхода^{/14/} в формулировке^{/15/}; для этого впервые был построен квазипотенциал э.-м. взаимодействия частиц со спином 1, учитывающий эффекты их э.-м. структуры.

Высокая точность вычислений уровней энергии μ^- -мезоатомов и μ^- -мезомолекул достигнута благодаря последовательному учету э.-м. факторов ядер при построении двухчастичного квазипотенциала э.-м. взаимодействия и оператора релятивистского взаимодей-

ствия системы трех частиц \checkmark , что приводит к выражениям для них в координатном пространстве, не обладающим сингулярностями на малых расстояниях.

Вычисленные в диссертации матричные элементы оператора \checkmark в адиабатическом представлении, играющие роль эффективных потенциалов в уравнении Шредингера для волновых функций мезомолекул, могут быть использованы для расчета сверхтонкого расщепления уровней энергии и других релятивистских эффектов для любой системы трех спиновых частиц с э.-м. взаимодействием, спины которых не превосходят 1.

Важным физическим результатом, полученным в данной диссертации, является описание энергетического спектра слабосвязанных состояний мезомолекулы $d\mu^-$ для них релятивистские поправки (включая сверхтонкое расщепление) составляют $\sim 20\%$ от величины энергии связи, и их учет существен для объяснения эксперимента^{/8/}. В диссертации также построены матричные элементы дипольных орто-пара переходов в мезомолекуле $pp\mu^-$, которые обусловлены целиком спиновым взаимодействием частиц.

Следующие результаты выдвигаются для защиты:

1. Построение квазипотенциала э.-м. взаимодействия двух частиц со спинами, не превосходящими 1, последовательно учитывающего их э.-м. структуру.

2. Обобщенная дипольная аппроксимация э.-м. факторов протона, дейтрона и тритона, приводящая к отсутствию сингулярностей на малых расстояниях и к простому аналитическому выражению для квазипотенциала в координатном пространстве.

3. Стационарное уравнение Шредингера с приближенным $O(c^{-2})$ релятивистским гамильтонианом для волновой функции системы трех спиновых частиц (со спинами не больше 1) с э.-м. взаимодействием в представлении полного момента и в адиабатическом представлении^{/13/}.

4. Схема теории возмущений для релятивистского уравнения Шредингера в адиабатическом представлении, в котором в качестве начального приближения используются нерелятивистские решения задачи трех тел с кулоновским взаимодействием^{/13/}.

5. Вычисление матричных элементов оператора релятивистского взаимодействия трех частиц \checkmark в адиабатическом представлении.

6. Вычисление релятивистских и связанных с э.-м. структурой ядер поправок к уровням энергии μ -мезомолекул и μ -мезоатомов и к энергии связи мезомолекул изотопов водорода, в том числе: сверхтонкое расщепление уровней с абсолютной точностью $\sim 10^{-3}$ эВ и релятивистских сдвигов значений энергии связи с точностью $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ эВ.

7. Вычисление (с точностью $\sim 10^{-3}$) релятивистских волновых функций и заселенностей стационарных состояний мезомолекул с орбитальным моментом $J \leq 1$.

8. Вычисление с точностью $\sim 10^{-3}$ g -факторов /10, 11/ для мезомолекул изотопов водорода и получение выражения для скорости процесса μ^- -захвата в мезомолекулах через скорости того же процесса в мезоатомах.

9. Вычисление матричных элементов орто-пара перехода в мезомолекуле $p\bar{p}\mu$.

Апробация работы. Результаты данной диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики и Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, Института атомной энергии им. И. В. Курчатова, Физического института АН СССР им. П. Н. Лебедева, кафедры теоретической физики Ленинградского государственного университета, Института ядерных исследований и ядерной энергетики АН НРБ, а также на XV зимней школе Ленинградского института ядерной физики (6-13 марта 1980 г.), Сессии ядерного отделения АН СССР (1979 г.) и на Международной конференции по атомной физике (17-22 августа 1978г., г. Рига).

Публикации. Результаты настоящей диссертации опубликованы в 4 работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений, она содержит 170 страниц машинописного текста, 1 рисунок и библиографический список из 82 названий.

Содержание работы

Во введении к диссертации (гл. I) дается общая схема физических процессов, происходящих при остановке μ -мезонов в смеси изотопов водорода /1, 2/. Отмечены успехи, достигнутые при описании этих

процессов в рамках адиабатического метода /2, 16/, и обсуждается область применения нерелятивистского подхода для их объяснения. Сформулированы основные задачи, решаемые в диссертации, которые связаны с необходимостью последовательного учета релятивистских (в том числе спиновых), а также обусловленных э.-м. структурой ядер эффектов динамики э.-м. взаимодействий в μ -мезоатомах и μ -мезомолекулах при вычислении их энергетического спектра и волновых функций.

Рассмотрена общая структура диссертации и кратко перечислены основные полученные результаты.

В главе 2 рассмотрена релятивистская задача двух спиновых частиц с э.-м. взаимодействием. § I содержит краткий обзор полученных до сих пор результатов в этом направлении; особое внимание уделено исследованиям легких мезоатомов. Мотивируется также выбор квазипотенциального /14/ (КП) подхода для решения поставленной задачи. § 2 представляет сжатое изложение КП подхода в формулировке Тодорова /15/. В §§ 3 и 4 построен в однофотонном приближении квазипотенциал э.-м. взаимодействия двух частиц со спинами $1/2$ или 1 , учитывающий их э.-м. структуру. Полученные общие результаты применяются в §§ 5, 6 для вычисления релятивистских поправок к бальмеровским значениям уровней энергии $E_a^{(NR)}$ основного состояния мезоатомов $a = p\mu, d\mu$ и $t\mu$. При вычислении поправок на э.-м. структуру ядер используется полученная в § 5 на основе результатов работ /17, 18/ и экспериментальных данных по упругому $e-t$ рассеянию /19/ обобщенная дипольная аппроксимация э.-м. формфакторов ядер p, d и t , которая обладает тем преимуществом, что в координатном пространстве квазипотенциал э.-м. взаимодействия ядра с μ^- -мезоном представляется простым аналитическим выражением и не имеет сингулярностей на малых расстояниях. В первом порядке теории возмущений для релятивистских значений E_a^σ уровней энергии орто ($\sigma = +1$) и пара ($\sigma = -1$) S -состояния мезоатомов получен результат
$$E_a^\sigma = \left(\frac{\sigma}{2} - \frac{1}{2s_a + 1} \right) \cdot \Delta E_a^{(hfs)} + \Delta E_a^{(shift)} + E_a^{(NR)}$$
 где s_a - спин ядра, а $\Delta E_a^{(hfs)}$ и $\Delta E_a^{(shift)}$ - вычисленные в работе сверхтонкое расщепление и полный сдвиг бальмеровского значения уровня энергии $E_a^{(NR)} = m\alpha^2/2$ (m - приведенная масса мезоатома).

Глава 3 посвящена релятивистскому описанию э.-м. взаимодействий в системе трех частиц со спинами, не превосходящими 1 .

§ I содержит краткий обзор нынешнего статуса теории многочастичных систем с э.-м. взаимодействием. Основные результаты главы получены в § 3, где в рамках мгновенной формы динамики системы с прямым взаимодействием^{/20,21/} (§ 2), с учетом условия разделимости^{/22/} и полученных в гл. 2 результатов о форме двухчастичного э.-м. квазипотенциала, построен релятивистский гамильтониан H системы трех спиновых частиц с э.-м. взаимодействием в виде

$$H = H^{(NR)} + V,$$

где $H^{(NR)}$ - нерелятивистский гамильтониан системы трех бесспиновых точечных частиц с кулоновским взаимодействием, а V - оператор релятивистского взаимодействия. В § 4 из стационарного уравнения Шредингера для волновой функции трехчастичной системы ψ^i

$$(H - E^i)\psi^i = (H^{(NR)} + V - E^i)\psi^i = 0$$

последовательно выводится конечная система дифференциальных уравнений в частных производных для компонент волновой функции в представлении полного момента. В § 5 эта система сводится к бесконечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений для компонент волновой функции в адиабатическом представлении^{/13/}. В § 6 построено приближенное решение системы в адиабатическом представлении, в котором релятивистские и связанные с э.-м. структурой частиц члены V учтены в первом порядке теории возмущений, а в качестве нулевого приближения использовано решение $\psi^{(NR)}$ нерелятивистской задачи трех тел с кулоновским взаимодействием

$$(H^{(NR)} - E^{(NR)})\psi^{(NR)} = 0.$$

В § 7 введен эффективный спиновый гамильтониан^{/10,11/}, позволяющий компактно записать секулярные уравнения теории возмущений для сверхтонкого расщепления нерелятивистских уровней энергии.

В главе 4 развитый в предыдущей главе метод применяется для описания влияния релятивистских эффектов и эффектов э.-м. структуры ядер на структуру уровней и на процессы с участием μ -мезомолекул изотопов водорода. § I содержит обзор последних результатов в этой области. В § 2 обсуждены допустимые в конкретном случае мезомолекул приближения при применении развитого в гл. 3 общего метода. В § 3 рассмотрено решение основной вычислительной проблемы, возникающей при практической реализации метода, - вычисления матричных элементов гамильтониана H в адиабатическом представлении. Основные физические результаты диссертации полу-

чены в §§ 4 - 6. В § 4 в первом порядке теории возмущений вычислены сверхтонкое расщепление уровней энергии $\Delta E^{(hfs)i}$ и заселенности соответствующих состояний μ -мезомолекул. В § 5 рассмотрены эффекты релятивистской динамики в процессе захвата μ -мезона ядрами мезомолекул: получено явное выражение для средней (с учетом статистической заселенности уровней стационарных состояний мезомолекул) скорости реакции μ -захвата в мезомолекулах через значения скорости той же реакции в мезоатомах и в двухуровневом приближении, вычислено значение матричного элемента дипольного орто-пара перехода в мезомолекуле $pp\mu$. В § 6 в первом порядке теории возмущений вычислены не зависящие от спинового состояния поправки к нерелятивистским уровням энергии мезомолекул, обусловленные э.-м. структурой ядер, отдачей и искажением парного кулоновского потенциала за счет релятивистских эффектов $\Delta E^{(shift)i}$. Окончательно для релятивистского значения $E^{\sigma i}$ энергии связи мезомолекулы, освобождающейся в процессе образования мезомолекулы при столкновении ядра с μ -мезоатомом в $1S$ орто ($\sigma=+1$) или пара ($\sigma=-1$) состоянии, получено выражение $E^{\sigma i} = E_a^{\sigma} - E^i = E^{(NR)i} + \left(\frac{\sigma}{2} - \frac{1}{2S_a+1}\right) \Delta E^{(hfs)i} - \Delta E^{(hfs)i} + \Delta E_a^{(shift)i} - \Delta E^{(shift)i}$, где $E^{(NR)i} = -E^{(NR)i}$ - нерелятивистское значение энергии связи мезомолекулы, вычисленное в адиабатическом подходе^{/16/}. В заключительном § 7 проведено обсуждение результатов гл. 4 и перспектив дальнейших исследований в этом направлении.

В приложениях приведены технические детали вычислений.

Основные результаты, полученные в диссертации :

1. Построен в приближении однофотонного обмена квазипотенциал э.-м. взаимодействия двух частиц со спинами $1/2$ и (или) 1 , последовательно учитывающий э.-м. формфакторы частиц.
2. Получена обобщенная дипольная аппроксимация э.-м. формфакторов протона, дейтрона и тритона, которая в координатном пространстве приводит к простому аналитическому выражению для квазипотенциала, не имеющего сингулярностей на малых расстояниях.
3. Построен приближенный $O(c^{-2})$ релятивистский гамильтониан э.-м. взаимодействия трех частиц со спинами $1/2$ или 1 и выведено стационарное уравнение Шредингера для релятивистской волновой функции трехчастичной системы в представлении полного момента и в адиабатическом представлении.

4. Развита схема теории возмущений для решения релятивистского уравнения Шредингера в адиабатическом представлении, в котором в качестве начального приближения используются решения нерелятивистской задачи трех бесспиновых частиц с кулоновским взаимодействием, найденных в адиабатическом подходе.

5. Вычислены матричные элементы оператора релятивистского взаимодействия в адиабатическом представлении.

6. Вычислены релятивистские и обусловленные э.-м. структурой ядер поправки к уровням энергии основного состояния μ -мезоатомов $\Delta E_a^{(hfs)}$ и $\Delta E_a^{(shift)}$ и всех известных стационарных состояний мезомолекул изотопов водорода $\Delta E^{(hfs)}$ и $\Delta E^{(shift)}$. Абсолютная точность вычисления сверхтонкого расщепления для уровней мезоатомов $\Delta E_a^{(hfs)}$ и мезомолекул $\Delta E^{(hfs)}$ в состояниях с орбитальным моментом $J \leq 1 \sim 10^{-3}$ эВ, для уровней мезомолекул с $J \geq 2 \sim 10^{-2}$ эВ, а сдвигов соответствующих уровней $\Delta E_a^{(shift)}$ и $\Delta E^{(shift)}$ $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ эВ.

7. Вычислены с относительной точностью $\sim 10^{-3}$ волновые функции и заселенности стационарных состояний мезомолекул с $J \leq 1$.

8. Вычислены с точностью $\sim 10^{-3}$ значения γ -факторов I, II для мезомолекул и получены явные выражения для скорости процессов μ^- -захвата ядрами мезомолекул через значения скоростей μ^- -захвата в основном состоянии мезоатомов.

9. Вычислены матричные элементы орто-пара переходов в мезомолекуле $pp\mu$.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бакалов Д.Д., Виноцкий С.И. Спиновые эффекты в задаче трех тел с электромагнитным взаимодействием. I. Сверхтонкая структура уровней энергии мезомолекулы $pp\mu$. Препринт ОИЯИ, Р4-12736, Дубна, 1979.
2. Бакалов Д.Д. Квазипотенциальное уравнение для μ -мезоатомов изотопов водорода. Препринт ОИЯИ, Дубна, Р4-13047, 1980.
3. Бакалов Д.Д., Виноцкий С.И., Мележик В.С. Сверхтонкая структура уровней энергии μ -мезомолекул изотопов водорода. Препринт ОИЯИ, Дубна, Р4-13039, 1980.
4. Бакалов Д.Д. Релятивистские поправки и поправки на электромагнитную структуру ядер к уровням энергии μ -мезомолекул изотопов водорода. Препринт ОИЯИ, Дубна, Р4-13046, 1980.

Литература

1. 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. Mesio 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 C.S. Academic Press, New York, v.II, 1975, p.219.
4. Mukhopadhyay N.C. Nuclear muon capture. Phys.Rep., 1977, vol.30C, p.1.
5. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. μ^- -Meson catalysis of nuclear fusion in a mixture of deuterium and tritium. Phys.Letters, 1977, vol.72B, p.80.
6. Виноцкий С.И. и др. Резонансное образование μ -мезомолекул изотопов водорода. ЭЭФ, 1978, т.64, с.849.
7. Быстрицкий В.М. и др. Резонансная зависимость скорости образования мезомолекул $d\mu$ в газообразном дейтерии. ЭЭФ, 1979, т.76, с.460.
8. Быстрицкий В.М. и др. Экспериментальное обнаружение и исследование мюонного катализа ядерной реакции синтеза ($d+t$). Сообщение ОИЯИ, Дубна, 1979, ДИ-12696.
9. Melezhib V.S., Ponomarev L.I. Vacuum-polarization in μ -mesic molecules of hydrogen isotopes. Phys.Lett., 1978, 77B, p.217.
10. Weinberg S. Muon absorption in liquid hydrogen. Phys.Rev. Lett., 1960, v.4, p.575.
11. Halpern A. Hyperfine structure of the $(p^+p)^+$, L=1, ortho bound state. Phys.Rev., 1968, v.174, p.62.
12. Sommerville W.B. Hyperfine structure of H_2^+ . Mon.Not.R. Astr.Soc., 1968, vol.139, p.63.
13. Ponomarev L.I., Vinitzky S.I. Adiabatic representation in the three-body problem with the Coulomb interaction. I. Choice of the effective Hamiltonian. J.Phys., 1979, vol.B12, p.567.
14. Logunov A.A., Tavkhelidze A.N. Quasi-optical approach in quantum field theory. Nuovo Cim., 1963, vol.29, p.380.
15. Рязов В.А., Тодоров И.Т. Квазипотенциальный подход к задаче о связанных состояниях в квартовой электродинамике. ЭЧАЯ, 1975, т.6, с.669.

16. Виноцкий С.И. и др. Вычисление уровней энергии μ -мезо-молекул изотопов водорода в адиабатическом представлении задачи трех тел. Препринт ОИЯИ, Дубна, 1980, P4-13036.
17. Биленькая С.И. и др. Об электромагнитных формфакторах протона. ЭТФ, 1971, т.61, с.2225.
18. Музафаров В.М., Троицкий В.Е. Беспотенциальная постановка обратной задачи рассеяния. Письма в ЭТФ, 1979, т.30, с.78.
19. Griffi T.A., Schiff L.I. Electromagnetic form factors. In: High Energy Physics, vol.I, 1967, New York, p.341.
20. Dirac P.A.M. Forms of relativistic dynamics. Rev.Mod. Phys., 1949, vol.21, p.392.
21. Foldy L.L., Krajcik R.A. Separable solutions for directly interacting particle systems. Phys.Rev., 1975, vol.D12, p.1700.
22. Coester F. Scattering theory for relativistic particles. Helv.Phys.Acta, 1965, vol.38, p.7.

Рукопись поступила в издательский отдел
II июня 1980 года.