

9

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-97-171

На правах рукописи  
УДК 539.189.2

КАРТАВЦЕВ  
Олег Иванович

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ  
ТРЕХЧАСТИЧНЫХ КУЛОНОВСКИХ СИСТЕМ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова  
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Л. Д. Блохинцев

доктор физико-математических наук Я. Реван

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН

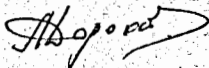
Защита диссертации состоится на заседании специализированного Совета  
К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединен-  
ного института ядерных исследований " 2 " июля 1997 г. по адресу:  
141980 г. Дубна, Московская область, ЛТФ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " 30 " мая 1997 г.

Ученый секретарь специализированного Совета:

доктор физико-математических наук



А. Е. Дорохов

## Общая характеристика работы

Актуальность В последние годы открыты и интенсивно исследу-  
ются экспериментально и теоретически долгоживущие трехчастичные  
кулоновские системы. Значительный интерес привлекает класс систем,  
состоящих из ядра гелия, электрона и тяжелой отрицательно заряжен-  
ной частицы. В частности, экспериментально наблюдались долгожи-  
вущие системы, возникающие в результате остановки в гелии антипро-  
тонов, отрицательных пионов и каонов. Эти метастабильные системы  
могут быть названы адронными атомами гелия и имеют ряд необычных  
свойств. К их числу можно отнести большое значение полного угло-  
вого момента, метастабильность, сложный колебательно-вращательный  
спектр.

Заметим, что еще в 60-х годах эксперименты по захвату отрицатель-  
ных пионов в жидком гелии явились основанием для первого предска-  
зания метастабильной системы  $He\ell^-e$ .

Наибольший интерес вызывает антипротонный гелий, состоящий  
из ядра изотопа гелия, антипротона и электрона. Эта система живет  
большое время (до десятков микросекунд), что на семь порядков пре-  
вышает характерное время жизни антипротонов в среде ( $\sim 10^{-12}$  с), а  
ее полный угловой момент имеет значения порядка  $L \sim 30-40$ . В осно-  
вном метастабильность рассматриваемой системы обусловлена именно  
большим значением полного углового момента. В частности, по этой  
причине пренебрежимо мала вероятность аннигиляции антипротона.  
В радиационных переходах (скорости которых порядка  $\mu s^{-1}$ ) момент  
изменяется на единицу и система должна совершить несколько таких  
переходов, чтобы оказаться в состоянии с коротким временем жизни.  
Процесс Оже-распада оказывается подавленным из-за большой мультитипольности перехода, т.е. углового момента вылетающего электрона.

Антипротонный гелий может быть использован для прецизионного измерения свойств антипротона что даёт возможность проверки таких фундаментальных принципов симметрии, как СРТ-инвариантность и слабый принцип эквивалентности для античастиц. Возможно также образование иных антипротонсодержащих систем, в частности, простейшего антиатома – антиводорода. Например, для образования антиводорода предложено использовать антипротонный гелий в реакциях перезарядки на позитронии. Более сложные системы могут образовываться при взаимодействии антипротонного гелия с атомами и молекулами среды.

В последнее время антипротонный гелий активно исследуется в экспериментах на самом мощном источнике антипротонов в ЦЕРН. Используя уникальную методику индуцированной лазером резонансной аннигиляции, удалось измерить со спектроскопической точностью энергии десяти переходов в  $^4\text{He}\bar{p}$  и двух переходов в  $^3\text{He}\bar{p}$ . Получена обширная информация о временной эволюции состояний, изотопических эффектах, влиянии плотности и фазового состояния среды, роли различных примесей.

Принципиальную проблему представляет изучение изотопической зависимости свойств адронных атомов. Экспериментально обнаружены атомы антипротонного гелия, содержащие оба стабильных изотопа гелия  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . Оже-переход является основным каналом распада и в значительной степени определяет время жизни.

По этой причине особый интерес вызывает сильный изотопический эффект в процессе Оже-распада антипротонного гелия. Действительно, приведенная масса тяжелых частиц (ядра гелия и антипротона) отличается на 7% для двух изотопов гелия ( $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ ), а скорости Оже-распада соответствующих состояний  $^3\text{He}\bar{p}$  и  $^4\text{He}\bar{p}$  отличаются в два-три раза. Этот изотопический эффект был впервые замечен и

получил теоретическое объяснение в представленной работе.

Значительный интерес к исследованиям зарядово-несимметричных мезомолекул вызван следующими причинами. Прежде всего, образование мезомолекул  $\text{HeN}\mu$  играет важную роль при изучении кинетики мюонов в среде. В частности, передача мюона от мюонного атома водорода к гелию происходит главным образом посредством образования этих мезомолекул. Этот механизм передачи мюона объясняет экспериментальные данные. Существенное значение имеет тот факт, что излучение, возникающее при распаде мезомолекул  $\text{HeN}\mu$ , удается наблюдать экспериментально. Таким образом, рассматриваемые системы являются единственным типом мезомолекул, непосредственно наблюдаемых в эксперименте. Недавние измерения спектров излучения с высоким разрешением могут быть использованы для определения квантового состояния мезомолекул. Фундаментальный интерес представляет возможность наблюдения ядерных реакций в зарядово-несимметричных мезомолекулах. Такие эксперименты позволяют определить скорость ядерных реакций при сверхнизких энергиях, труднодоступных в экспериментах обычного типа. Следует отметить значимость такой информации для астрофизических проблем. В настоящее время системы  $\text{HeN}\mu$  активно исследуются экспериментально. Интересными для изучения особенностями мезомолекул  $\text{HeN}\mu$  являются наличие двух конкурирующих каналов распада (радиационного и безызлучательного), а также сильная изотопическая зависимость скорости безызлучательного распада.

Цель работы состоит в теоретическом исследовании двух типов долгоживущих трехчастичных кулоновских систем: антипротонного гелия  $\text{He}\bar{p}$  и зарядово-несимметричных мезомолекул  $\text{HeN}\mu$ .

### Научная новизна и практическая ценность.

- Разработан вариационный метод расчета метастабильной системы с большим полным угловым моментом  $L \sim 30 - 40$ . Определены уровни энергии, скорости радиационных переходов, релятивистское расщепление уровней, скорости Оже-распада антипротонного гелия различного изотопного состава. Предсказана возможность наблюдения расщепления уровней  ${}^6\text{He}\bar{p}$  в переходах между состояниями с квантовыми числами  $(L, N) \rightarrow (L - 1, N + 2)$ .
- Впервые рассчитаны свойства  ${}^6\text{He}\bar{p}$ . Изучены изотопические зависимости в антипротонном гелии, обнаружен сильный изотопический эффект в Оже-распаде. Дано качественное объяснение этого эффекта.
- Разработан метод решения ряда задач в кулоновской задаче трех тел с помощью "поверхностных" гиперсферических функций.
- Рассчитаны уровни энергии, скорости радиационного и безызлучательного распадов, спектры излучения систем  ${}^{3,4}\text{He}^{1,2}\text{H}\mu$ . По спектрам излучения определено квантовое состояние  $L = 1$  экспериментально наблюдаемых мезомолекул  ${}^{3,4}\text{He}\bar{d}\mu$ .

### На защиту выдвигаются следующие результаты.

- Разработан вариационный метод расчета ряда характеристик метастабильной системы. Рассчитаны уровни энергии, вероятности радиационных переходов, расщепление уровней, вызванное релятивистским взаимодействием, скорости Оже-распада систем  ${}^{3,4,6}\text{He}\bar{p}$ .
- Предсказана возможность наблюдения расщепления уровней антипротонного гелия в переходах между состояниями с кванто-

выми числами

$$(L, N) \rightarrow (L - 1, N + 2).$$

- Изучены изотопические зависимости свойств антипротонного гелия. Обнаружен и качественно объяснен сильный изотопический эффект в Оже-распаде.
- Разработан вариационный метод построения "поверхностных" гиперсферических функций и определения коэффициентов гиперрадиальных уравнений для кулоновской задачи трех тел.
- В рамках единого подхода рассчитаны уровни энергии, скорости радиационного и безызлучательного распадов, спектры излучения систем  ${}^{3,4}\text{He}^{1,2}\text{H}\mu$ . Идентифицировано квантовое состояние  $L = 1$  экспериментально наблюдаемых мезомолекул  ${}^{3,4}\text{He}\bar{d}\mu$ .

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Third Biennial Conference on Low Energy Antiproton Physics, Bled, Slovenia, September 12-17, 1994  
Third International Symposium on Muon and Pion Interactions with Matter, Dubna, Russia, October 18-21, 1994  
International Workshop on Hadronic States in Helium, Balatonfured, Hungary, January 26-28, 1995  
15th European Conference on Few-Body Problems in Physics, Peniscola, Spain, June 5-9, 1995  
International Symposium on Exotic Atoms and Nuclei, Hakone, Japan, June 7-10, 1995  
International Symposium on Muon Catalyzed Fusion, Dubna, Russia, June 19-24, 1995  
Third Conference on Nucleon-Antinucleon Physics, Moscow, September 11-16, 1995

International Workshop on Antimatter Gravity and Antihydrogen Spectroscopy, Sepino, Italy, May 19–25, 1996,

The ITAMP Workshop on Exotic Atoms, Harvard, USA, July 11–13, 1996

International Conference on Computational Modelling and Computing in Physics, Dubna, Russia, September 16–20, 1996

и на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Дубна.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1]–[8].

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Общий объем диссертации 70 страниц машинописного текста, включая 8 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 73 наименований.

### Содержание работы

**Во введении** дается общее описание двух классов рассматриваемых систем, современного состояния исследований в этой области, а также их значимости и перспектив. Формулируются цели исследования и поставленные в работе задачи.

**Первая глава** содержит описание результатов исследования антипротонного гелия.

В разделе 1.1 даны исходные уравнения и обозначения, изложен метод расчета уровней энергии и волновых функций. Обсуждается структура волновых функций системы и построение приближенного гамильтониана системы, позволяющего использовать вариационный метод.

Оправданием вариационного подхода является малость скоростей распада ряда экспериментально наблюдаемых состояний антипротонного гелия.

Кратко излагается методика расчетов, включая использованную систему пробных функций, вычисление матричных элементов и пара-

метры, характеризующие численные процедуры.

Приводятся результаты расчета уровней энергии пяти нижних состояний систем  ${}^{3,4,6}\text{He}\bar{p}$  в интервале  $31 \leq L \leq 37$ , представленные в работах [1, 2, 5].

В разделе 1.2 изложены результаты расчета вероятностей радиационных переходов в  ${}^{3,4,6}\text{He}\bar{p}$ . Большое время жизни метастабильных состояний антипротонного гелия по отношению к процессам Оже-распада и столкновительного девозбуждения приводит к тому, что наиболее важными для описания кинетики рассматриваемой системы являются радиационные переходы. Поскольку в дипольных переходах полный угловой момент системы изменяется на единицу, происходит последовательное шаг за шагом уменьшение полного углового момента и энергии до тех пор, пока система не достигнет состояния с большой скоростью Оже-распада.

Для расчета вероятностей радиационных дипольных переходов [1, 2, 5] использованы волновые функции, полученные с использованием широкого набора вариационных пробных функций. Основными особенностями являются значительно большая вероятность радиационных переходов между состояниями  $L, N \rightarrow L-1, N$  и наличие максимума в зависимости от полного углового момента.  $L, N$  здесь и далее используются для обозначения полного углового момента состояния и нумерации состояний с данным  $L$ . Эти результаты позволяют получить описание радиационного каскада в антипротонном гелии.

В разделе 1.3 содержатся результаты расчета расщепления уровней антипротонного гелия, вызванного релятивистским взаимодействием. Наличие релятивистских взаимодействий в рассматриваемой системе приводит к расщеплению энергетических уровней, пропорциональному  $\alpha^2$  ( $\alpha$  – постоянная тонкой структуры) и превращению отдельных спектральных линий в мультиплеты.

Благодаря чрезвычайно малому отношению массы электрона к массам ядер, наибольший вклад в расщепление даёт взаимодействие со спином электрона  $s_e$ . Взаимодействие сохраняет сумму  $\mathbf{j} = \mathbf{L} + \mathbf{s}_3$  полного углового момента  $\mathbf{L}$  и спина электрона  $\mathbf{s}_3$ , расщепляя таким образом каждый уровень на два подуровня, принадлежащих собственным значениям  $j = L \pm 1/2$ . Малость релятивистского взаимодействия приводит к тому, что в радиационных переходах приближенно сохраняется квантовое число  $j$ . В результате каждая спектральная линия, соответствующая переходу из состояния  $L_i N_i$  в состояние  $L_f N_f$  превращается в дублет линий.

Величина такого расщепления была рассчитана для ряда состояний  ${}^4\text{He}\bar{e}$  [3, 2] и была предсказана возможность экспериментального наблюдения этого эффекта для переходов между состояниями  $L, N \rightarrow L - 1, N + 2$ . В недавно проведенной серии экспериментов этого года указанное расщепление было обнаружено.

Раздел 1.4 посвящен проблеме определения вероятности Оже-распада антипротонного гелия. Основной особенностью является изменение вероятности Оже-распада примерно на три порядка при изменении мультипольности перехода на единицу.

Наибольшие затруднения в расчете этого процесса вызываются тем обстоятельством, что для определения малой скорости распада необходимо вычисление чрезвычайно малых компонент волновой функции системы с большим значением полного углового момента. Главное внимание уделено таким состояниям, для которых минимальная мультипольность Оже-перехода, т.е. угловой момент вылетающего электрона  $\Delta l$  принимает значение  $\Delta l = 3, 4$ . Поскольку скорости распада таких состояний лежат в интервале  $10^4 - 10^9 \text{c}^{-1}$ , а скорости радиационных переходов  $\sim 10^6 \text{c}^{-1}$ , можно считать, что изменение мультипольности от  $\Delta l = 3$  к  $\Delta l = 4$  является переходом от метастабильных к нестабильным

состояниям. Поэтому их расчет является необходимым для описания эволюции образовавшегося антипротонного гелия. Результаты расчета Оже-распада даны в работах [2, 4, 6].

В Разделе 1.5 обсуждаются изотопические зависимости в антипротонном гелии. Проведенные в данной работе расчеты  ${}^6\text{He}\bar{e}$  дают третью точку в изотопических зависимостях свойств антипротонного гелия. Заметим, что время жизни  ${}^6\text{He}$  ( $0.8\text{c}$ ) достаточно велико для наблюдения такой системы.

Интересным и совершенно новым результатом является наличие сильного изотопического эффекта в процессе Оже-распада антипротонного гелия. В частности, приведенная масса тяжелых частиц (ядра гелия и антипротона) отличается на 7% для двух изотопов гелия ( ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$ ) а скорости Оже-распада соответствующих состояний  ${}^3\text{He}\bar{e}$  и  ${}^4\text{He}\bar{e}$  отличаются в два-три раза [4, 6].

В кратком изложении главной причиной эффекта является существенная зависимость от массы изотопа гелия малой компоненты волновой функции, описывающей движение электрона с достаточно большими значениями углового момента ( $\geq 2$ ). Именно эта компонента определяет в основном скорость Оже-распада. В основном возбуждение электрона с угловым моментом  $\geq 2$  вызывается, во-первых, квадрупольной частью взаимодействия электрона с парой тяжелых частиц в первом порядке теории возмущения и, во-вторых, дипольной частью взаимодействия во втором порядке теории возмущения. Компенсация этих двух вкладов, а также разная зависимость дипольного и квадрупольного взаимодействия от массы изотопа гелия приводит к вышеуказанной зависимости.

Вторая глава содержит результаты расчета зарядово несимметричных мезомолекул  $\text{HeN}\mu$ . Для исследования свойств зарядово несимметричных мезомолекул  $\text{HeN}\mu$  был применен метод "поверхност-

ных" гиперсферических функций, позволяющий в рамках единого подхода получить энергии мезомолекул и характеристики распада в различные каналы [7, 8]. Этот подход был с успехом применен ранее также к расчету систем  $H^-$ ,  $dt\mu$ .

В Разделе 2.1 излагается метод гиперсферических "поверхностных" функций, с помощью которого удастся дать реалистическое описание различных свойств рассматриваемых систем. В основе метода лежит разработанный и реализованный вариационный способ расчета "поверхностных" гиперсферических функций, позволяющий получить эффективные потенциалы и коэффициенты гиперрадиальных уравнений с правильным асимптотическим поведением при малых и больших значениях гиперрадиуса.

В этом разделе сформулированы основные уравнения и проанализированы основные приближения, использованные при решении поставленных задач, а также введены обозначения для Главы 2. Далее, излагается метод расчета коэффициентов гиперрадиальных уравнений и даются выражения для вероятности безызлучательного и радиационного переходов.

В Разделе 2.2 приведены результаты расчета уровней энергии и вероятностей безызлучательного распада систем  ${}^3,4\text{He}^{1,2}\text{H}\mu$  для состояний с полным угловым моментом  $L = 0, 1, 2$  [7, 8]. Обсуждается вычисление матричных элементов, приводятся параметры и оценка точности численных расчетов.

Рассчитанные значения энергии и скорости безызлучательного распада сравниваются с результатами других вычислений. Дается объяснение зависимости от полного углового момента  $L$  и масс изотопов гелия и водорода.

Интересным результатом является существенная изотопическая зависимость скорости безызлучательного распада. Эксперименты также

указывают на наличие сильного изотопического эффекта. Объяснение эффекта заключается в том, что скорость распада определяется поведением волновой функции в области малых гиперрадиусов. В этой области волновая функция определяется экспоненциально малой вероятностью проникновения в классически запрещенную область и зависит экспоненциально от приведенной массы тяжелых частиц.

В Разделе 2.3 приведены результаты расчета спектров излучения и скоростей радиационного распада систем  $\text{He}d\mu$  и  $\text{He}r\mu$  [8]. Дается объяснение формы спектров, а также зависимости от изотопного состава и углового момента мезомолекулы.

Вероятности распада в разные каналы оказываются сравнительно близкими между собой. В противоположность безызлучательному распаду, изотопическая зависимость скорости радиационного распада  $\lambda_r$  является сравнительно слабой. Наличие изотопического эффекта приводит к существенно большей скорости безызлучательного распада для систем  $\text{He}r\mu$  и, вследствие этого, малой интенсивности излучения.

Интересную проблему представляет определение состояния образовавшихся мезомолекул. Сравнение спектров излучения мезомолекул  ${}^3,4\text{He}d\mu$  для состояний с полным угловым моментом  $L = 0, 1$  с последними экспериментами позволяет заключить, что распад происходит преимущественно из состояний с  $L = 1$ . Хотя точка зрения об образовании зарядово-несимметричных мезомолекул  $\text{HeH}\mu$  в состоянии с  $L = 1$  распространена, доказательство этого факта ранее отсутствовало. Спектры мезомолекул  ${}^3,4\text{He}r\mu$  в настоящее время измерены со значительно меньшей точностью, что не позволяет сделать определенное присвоение углового момента для системы  ${}^4\text{He}r\mu$ , а спектр  ${}^3\text{He}r\mu$  измерен с еще меньшей точностью.

**В заключении** суммированы полученные в диссертации результаты. Обсуждается использование этих результатов и перспективы

## Публикации по результатам диссертации

- [1] Kartavtsev O. I., Antiprotonic Helium Atoms, Few-Body Systems Suppl. **8**, 225-234 (1995)
- [2] Kartavtsev O. I., Variational calculation of antiprotonic helium atoms, Ядерная физика **59**, 1541-1550 (1996)
- [3] Kartavtsev O. I., Energy-level splitting in antiprotonic helium atoms, Hyperfine Interactions, **103**, 369-375 (1996)
- [4] Fedotov S. I., Kartavtsev O. I., Monakhov D. E., Auger decay rates of  $^{3,4}\text{He}\bar{p}$ , Ядерная физика **59**, 1717-1719 (1996).
- [5] Kartavtsev O. I., Calculation of energy levels and lifetimes of antiprotonic helium atoms, Proc. of the 3rd Intern. Symp. on Muon and Pion Interactions with Media, (Dubna, 1995) p. 138-142
- [6] Fedotov S. I., Kartavtsev O. I., Monakhov D. E., On the decay of antiprotonic helium atoms, JINR Rapid Communications No. 5 (73), 13-20 (1995)
- [7] Belyaev V. B., Kartavtsev O. I., Kochkin V. I. and Kolganova E. A., Binding energies and nonradiative decay rates of  $\text{He}\bar{p}\mu$ -molecular ions, Phys. Rev. A **52**, 1765-1768 (1995).
- [8] Belyaev V. B., Kartavtsev O. I., Kochkin V. I. and Kolganova E. A., Decay rates and  $\gamma$ -rays spectra of  $\text{He}\bar{p}\mu$  systems, Preprint JINR E4-96-429 (1996), *Z. Phys. D, in print*

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 мая 1997 года.