

Л-879



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3324

4-95-108

На правах рукописи
УДК 539.18.182+539.189.1

ЛХАГВА
Ойдовын

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОТОНОВ
И ЧАСТИЦ С АТОМАМИ ГЕЛИЯ
В ОСНОВНОМ И ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1995

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Блохинцев Леопид Дмитриевич

Научно-исследовательский
институт ядерной физики МГУ (г. Москва)

доктор физико-математических наук, профессор
Сенашенко Василий Савельевич
Физический факультет МГУ (г. Москва)

доктор физико-математических наук, профессор
Лендсел Владимир Иванович
Ужгородский государственный
университет, Украина (г. Ужгород)

Ведущая организация:
Физический институт РАН (г. Москва)

Защита состоится " _____ " _____ 1995 г. в _____ часов на заседании специализированного совета Д 047.01.01 по адресу: 141980, г. Дубна, ЛТФ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физ.-мат. наук

В. И. Журавлев

Настоящая диссертация посвящена теоретическому исследованию прямого и резонансного переходов атомов гелия из основного и возбужденных состояний в континуум под действием фотонов, быстрых электронов, медленных отрицательных мюонов и адронов.

Актуальность темы.

В настоящее время фундаментальный интерес представляют прямые и резонансные процессы взаимодействия фотонов и заряженных элементарных частиц с атомами. Такие столкновения сопровождаются проявлением разнообразных механизмов процесса, формированием определенной структуры континуума, в том числе квазистационарных (автоионизационных) состояний в континууме атомных и экзотических атомных систем, характеризуются богатым спектром фрагментов в выходных каналах реакции. Расчеты характеристик таких процессов важны для различных областей физики и прикладных задач и вместе с тем очень сложны, поскольку задача многотельная, и существенную роль играет кулоновское взаимодействие между частицами. Такая задача точно не может быть решена даже для случая простейших атомов. Атом гелия как простейшая многоэлектронная система давно служит отличной лабораторией для разработки новых методов нерелятивистской теории многих тел и их экспериментальной проверки.

К процессу резонансной фотоионизации атома гелия была впервые применена в 60-е годы теория Фано [1]. Впервые профили автоионизационных состояний (АИС) были экспериментально идентифицированы в 1963 г. в спектрах фотопоглощения на атоме гелия. Затем была проведена серия экспериментов по возбуждению АИС в атоме гелия быстрыми электронами, а также наблюдения АИС и в других процессах атомных столкновений. В итоге к концу 60-х годов были развиты мощные методы экспериментального исследования АИС, такие как фотопоглощение, регистрация спектров эжекции, потеря и регистрация частиц на совпадение.

Достоинство вышеупомянутого метода У. Фано заключается в наглядности интерпретации резонансных явлений в атомах, которая обеспечивается его параметрическим представлением. Однако для практических расчетов этот метод не менее сложен по сравнению с методом Фешбаха, методами сильной связи каналов, сложными вариационными и другими прямыми методами решения уравнения Шредингера. Эта трудность была преодолена в подходе, предложенном и разработанном В. В. Балашовым и его сотрудниками [2, 3]. Последний, так называемый диагонализационный метод В. В. Балашова, по существу, при выполнении определенных физических условий дает реализацию общего подхода У. Фано в гораздо более простой форме и обеспечивает хорошую точность описания эксперимента. В отношении описания неупругих столкновений медленных отрицательных мюонов и адронов (частиц M^-) с атомами гелия и водорода из имеющихся теоретических подходов наиболее простым является метод полуклассического решения уравнений

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

связи двух- и трехчастичных каналов [4]. Названные методы дают довольно хорошие результаты для описания прямых и резонансных процессов взаимодействия фотонов и тяжелых отрицательно заряженных частиц с атомами гелия, находящимися в основном состоянии.

В данной области в последнее время открываются новые широкие перспективы, связанные с освоением новых экспериментальных методов: использование новых пучков фотонов и элементарных частиц, приготовление атомных мишеней в возбужденных (метастабильных) состояниях. Благодаря этому ныне технический уровень эксперимента вплотную подошел к систематическому изучению взаимодействия фотонов и частиц с атомами гелия, находящимися в возбужденных состояниях.

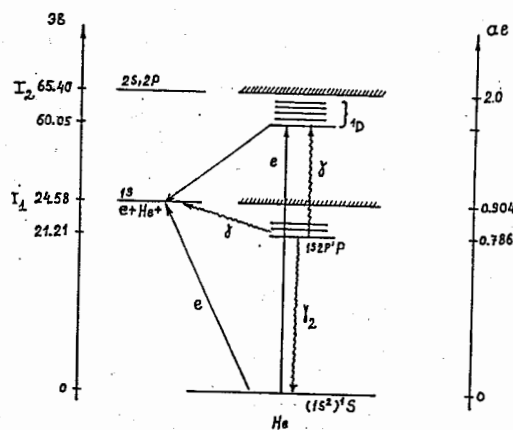


Рис. 1. Схема переходов атома гелия из основного ($1s^2$) $1S$ и возбужденного ($1s2p^1P$) состояний в континуум под действием быстрых электронов и фотонов ниже второго порога I_2 . Здесь $1D$ - автоионизационные состояния, сплошная и волнистая линии обозначают процессы, идущие под действием электронов и фотонов соответственно.

В настоящей работе рассмотрены: прямые и резонансные процессы ионизации атома He быстрыми электронами, фотоионизация возбужденного атома He, рекомбинация иона He^+ с образованием выстроенного состояния атома гелия и неупругие столкновения медленных частиц M^- с атомами H и атомами He в метастабильных состояниях ($2S$). Эти процессы рассматриваются в области ниже второго порога ионизации атома. При этом особенности структуры атома гелия (наличие перекрывающихся АИС в континууме и близко расположенных, почти вырожденных возбужденных состояний $2S$ и $2P$) проявляются по-разному в разных выходных каналах рассматриваемых процессов (см. рис. 1), по-разному в этих специфических условиях интерферируют между собой и ветви разных механизмов процесса (прямого и резонансного). При разработке математического аппарата для описания таких процессов наряду со стремлением сохранить достоинство диагонализационного метода и метода полуклассического решения уравнений связи двух- и трехчастичных каналов возникла необходимость учесть специфические вышеупомянутые

особенности структуры атома гелия.

К началу выполнения диссертационного исследования были актуальны следующие задачи:

- Описание прямых и резонансных процессов ионизации атома гелия быстрыми электронами (в копланарной геометрии): учет интерференции и перекрытия близко расположенных резонансов, каждый из которых сильно взаимодействует с прилегающим континуумом, а также описание соотношения их выходов при разных кинематических условиях ($e, 2e$)- реакции.

- Разработка инвариантной параметрической формы записи сечений эжекции с явным включением в эту запись мультиполей перекрывающихся АИС. Формула, полученная интегрированием тройного дифференциального сечения ($e, 2e$)-процесса в копланарной геометрии неадекватна для описания спектра эжекции, так как в ней угловые моменты уходящих электронов не выделены явно и невозможно ввести полные (мультипольные) моменты системы ($2e + He^+(1s)$).

- Разработка параметрического формализма для описания резонансных структур, проявляющихся в фотоионизации возбужденного атома и диэлектронной рекомбинации иона на выстроенное состояние атома гелия, при которых наблюдаются следующие особенности: возбуждение АИС с большим значением профильного индекса (по абсолютной величине), явления уширения и смещения профилей резонансов в безразмерных характеристиках. Эти особенности не могут найти объяснения в рамках параметрических теорий У. Фано и В. В. Балашова, которые описывают профили резонансов, локализованные вблизи положения АИС (резонансное приближение).

- Разработка формализма для описания угловых распределений вторичных фотонов, испускаемых из возбужденного (выстроенного) атома в след за диэлектронной рекомбинацией иона A^+ .

- Проявление резонансов в энергетической зависимости коэффициента угловой анизотропии вторичных фотонов γ_2 , испускаемых из атома $He(2^1P)$ в след за диэлектронной рекомбинацией иона He^+ . Изучение на примере этих резонансов особенностей формирования резонансной структуры в обратном процессе - фотоионизации возбужденного атома гелия: явления уширения и смещения.

- Исследование неупругих столкновений медленных отрицательных мюонов и адронов с атомами H и He в метастабильных состояниях ($2S$), а также замедления и кулоновского захвата этих частиц в смеси атомов в основном и метастабильных состояниях. Эти задачи актуальны с точки зрения получения и изучения новых долгоживущих метастабильных адронных состояний в гелии. Экспериментальные данные [11] (LEAR, ЦЕРН и КЕК, Япония) показывают, что отрицательные адроны, оставившиеся в гелии с вероятностью 2 - 4 %, попадают в метастабильные состояния. В частности, для метастабильных антипротонных состояний в обычном гелии время жизни составляет 2 - 3 мкс, что превышает более чем в миллион раз типичное (пикосекундное) время аннигиляции антипротона в среде. В то же

время теоретические оценки [12] и экспериментальные данные [11] по первичным заселенностям долгоживущих адронных состояний показывают, что в обычной мишени гелия заселяется лишь небольшая часть метастабильных адронных состояний типа круговых орбит. При медленных столкновениях тяжелых частиц M^- с весьма рыхлыми и слабосвязанными (метастабильными) атомами сечения их кулоновского захвата в состояния с большим значением главного квантового числа могут оказаться довольно большими. Эти процессы могут быть исследованы экспериментально. Время жизни состояния $He(2^3S)$ довольно велико, а техника приготовления мишеней, содержащих возбужденные атомы, хорошо разработана.

- Разработка математического аппарата для описания медленных неупругих столкновений частиц M^- с атомами H и He в метастабильных состояниях (2S) при наличии вырожденных и весьма близко расположенных возбужденных состояний (2S и 2P).

Цель настоящей работы:

1. Развитие теоретического формализма и создание программного обеспечения для единого описания процессов прямой и резонансной ионизации атомов гелия фотонами и быстрыми электронами из основного и возбужденных состояний и диэлектронной рекомбинации иона на выстроенное состояние атома в области спектра под вторым порогом.

2. Количественный анализ теоретических результатов и интерпретация имеющихся экспериментальных данных по возбуждению континуума атомов гелия в рассматриваемых процессах ионизации и рекомбинации.

3. Исследование неупругих столкновений медленных отрицательных мюонов и адронов (частиц M^-) с атомами H и He в метастабильных состояниях (2S), а также кинетических характеристик замедления и кулоновского захвата этих частиц в смеси атомов в основном и метастабильных состояниях. Разработка математического аппарата для изучения поставленной задачи.

Научная новизна.

- Впервые предложена параметрическая формула для описания резонансного профиля взаимодействующих 1P и 1D АИС посредством суммы его вкладов в каждом мультипольном сечении эжекции (e,2e)- реакции.

- Впервые выявлена "протяженная структура" резонансов в фотоионизации возбужденного атома гелия (простирающаяся на сотни естественных ширин от положения АИС) и предложено обобщение диагонализационного метода на случай ее описания. Показано, что "протяженный профиль" резонанса характеризуется энергетической зависимостью функций ширины ($\Gamma_{\mu,L}(E)$) и профильного индекса ($q_{\mu,L}^i(E)$) в мультипольных каналах процесса. Показано, что подобные особенности континуума проявляются в обратном процессе - в рекомбинации иона гелия на возбужденный уровень атома гелия.

- Впервые проведены последовательные расчеты и дана интерпретация экспериментов по спектрам эжекции и совпадения в прямой и резонансной $He(e,2e)He^+$ -реакциях в области больших энергий налетающего электрона.

- Впервые показано, что угловые распределения вторичных фотонов γ_2 , испускаемых из выстроенного атома $He(2^1P)$ вслед за электронно-ионной рекомбинацией, носят выраженный резонансный характер. Показано, что проявление "протяженной структуры" в процессах фотоионизации возбужденного атома гелия и диэлектронной рекомбинации иона на выстроенное состояние приводит к уширению и смещению профиля резонансов в коэффициентах угловой анизотропии фотоэлектрона и вторичного фотона.

- Впервые получена оценка сечения кулоновского захвата отрицательных мюонов и адронов метастабильными атомами гелия. Показано, что сечение захвата более чем на порядок превышает соответствующее сечение на атоме в основном состоянии, а кинетические характеристики замедления и захвата частиц весьма чувствительны к присутствию метастабильных атомов. Впервые показано, что при захвате антипротона метастабильным гелием заселяются круговые орбиты с очень большими значениями главного квантового числа (вплоть до $n \sim 150$).

Научная и практическая ценность работы.

- Выявленные в данной работе "протяженные структуры" резонансов и подход к их описанию могут служить отправным пунктом в исследованиях фотоионизации многоэлектронных атомов из слабосвязанных возбужденных состояний.

- Предложенная инвариантная формула сечения эжекции может быть использована как новый методический ориентир в экспериментальных исследованиях для измерения мультипольных параметров взаимодействующих 1P и 1D АИС в спектрах эжекции.

- Полученные в работе численные оценки характеристик резонансов, проявляющихся в $He(e,2e)He^+$ -реакции, фотоионизации возбужденного атома гелия и в угловом распределении вторичного фотона в диэлектронной рекомбинации могут быть использованы для их экспериментальных проверок.

- Полученные в работе оценки по заселению антипротона в метастабильном гелии могут представлять интерес для получения и изучения новых долгоживущих метастабильных состояний адронов в гелии.

- Полученные в диссертации количественные сведения о характеристиках прямой и резонансной ионизации атома гелия из дискретных состояний могут быть использованы в заполняемых пыле бапках данных типа "Атом" и "Авогадро", ориентированных на использование в прикладных задачах атомной физики, астрофизики, физики плазмы, лазеров и др.

Методика и программное обеспечение, разработанные для изучения в едином подходе прямой и резонансной ионизации атома гелия, а также столкновений частиц M^- с метастабильными атомами могут найти применения в дальнейших подобных исследованиях.

Положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Теоретический формализм единого описания прямой и резонансной ионизации атомов гелия из основного и возбужденных состояний фотонами и быстрыми

электронами. Новые параметрические формулы для описания мультипольных профилей резонансов в спектрах фотопоглощения и эжекции. Формулы для угловых распределений вторичных фотонов, следующих вслед за рекомбинацией иона на выстроенный атом гелия.

2. Комплексное программное обеспечение, новые теоретические результаты для различных характеристик прямой и резонансной ионизации атома гелия из основного и возбужденного состояний в спектрах фотопоглощения, эжекции и совпадения. Учет различных типов корреляции электронов, в том числе корреляций, описываемых многоконфигурационным методом Хартри-Фока (MCHF).

3. Неупругие столкновения медленных отрицательных мюонов и адронов (частиц M^-) с атомами H и He в метастабильных состояниях (2S), кинетические характеристики замедления и кулоновского захвата этих частиц в смеси атомов в основном и метастабильных состояниях. Разработка математического аппарата для изучения поставленной задачи.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. На основе диагонализационного метода развит теоретический формализм для единого описания процессов прямой и резонансной ионизации атомов гелия фотонами и быстрыми электронами из основного и возбужденных состояний, а также рекомбинации иона He^+ на выстроенное состояние при условии возбуждения перекрывающихся АИС, в том числе:

- Предложена новая параметрическая формула для сечения эжекции. Профиль структуры, обусловленный близко расположенными резонансами, представлен в виде суммы мультипольных вкладов, которые характеризуются "своими" резонансными параметрами, в том числе параметрами интерференции.

- Обобщен диагонализационный метод на случай описания резонансной структуры континуума, проявляющейся в фотопроцессах с участием возбужденного атома гелия. Энергетическая зависимость профиля резонанса представлена в виде суперпозиции мультипольных профилей, каждый из которых описывается функциями ширины ($\Gamma_{\mu,L}(E)$) и профильного индекса ($q_{\mu,L}^i(E)$) в данном канале (L).

- Разработан общий формализм для расчетов энергетической зависимости угловых распределений вторичных фотонов, испускаемых вслед за диэлектронной рекомбинацией иона A^+ .

2. Получены оценки для интерференции, перекрытия близко лежащих резонансов и соотношения их выходов в $(e,2e)$ - реакциях, а также для динамики коэффициента угловой асимметрии электронов эжекции при разных кинематических условиях процесса. Дана интерпретация имеющихся экспериментальных данных в области энергии налетающего электрона $E \geq .5$ кэВ. Получено хорошее согласие теории и эксперимента.

3. Показано, что в процессах фотоионизации возбужденного атома гелия и диэлектронной рекомбинации иона на выстроенное состояние автоионизационные резонансы могут проявляться в характеристиках прямых процессов как структуры, простирающиеся на много ширины от положения АИС ("протяженная структура"

резонанса). Показано, что в основе проявления "протяженных структур" лежит интерференция между амплитудой прямой ионизации и амплитудой фотопереходов через автоионизационное состояние с большим абсолютным значением функции профильного индекса. Предложен возможный вариант экспериментального измерения функций ширины и профильного индекса.

4. Показано, что в энергетической зависимости коэффициента угловой анизотропии вторичных фотонов γ_2 , испускаемых из выстроенного атома He(2^1P) вслед за диэлектронной рекомбинацией, проявляется выраженный резонансный характер. Предсказываемые резонансы могут быть использованы для экспериментального изучения явлений уширения и смещения профилей резонансов.

5. На основе полуклассического приближения для решения уравнений связи двух- и трехчастичных каналов разработан теоретический аппарат для описания неупругих столкновений частиц M^- с атомами H и He в метастабильных состояниях (2S) с использованием линейных комбинаций атомных волновых функций, исключаящих дипольный член из связи двухчастичных каналов.

6. Показано, что сечения неупругого взаимодействия частиц M^- с метастабильными атомами H и He более чем на порядок превышают соответствующие сечения на атоме в основном состоянии. Присутствие метастабильных атомов в среде существенно влияет на кинетические характеристики замедления и захвата частиц, время замедления частиц при 100%-й концентрации метастабильных атомов гелия уменьшается примерно на порядок.

7. Показано, что использование метастабильной гелиевой мишени в принципе открывает возможность изучения новой области долгоживущих адронных состояний в гелии, в частности, при захвате антипротона метастабильным атомом He могут заселяться круговые орбиты со значениями главного квантового числа вплоть до $n \sim 150$.

8. Для численной реализации поставленных задач создан комплекс программного обеспечения. Получены новые численные результаты для спектроскопических характеристик резонансов, формируемых при ионизации атомов He фотонами и электронами из основного и возбужденных состояний, а также для полуклассических и кинетических характеристик неупругих столкновений частиц M^- с атомами H и атомами He в метастабильных состояниях и в смеси этих атомов в основном и возбужденных состояниях соответственно.

Апробация диссертации публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в трудах: XVI-XVIII *Международных конференций по физике электронных и атомных столкновений (ICPEAC)*: Нью-Йорк -1989, Брисбан -1991, Аархус -1993;

Международной конференции по спектроскопии и столкновениям малоэнергетических ионов: Бухарест -1988;

X-XI *Всесоюзных конференций по физике электронных и атомных столкновений (ВКАЭС)*: Ужгород -1988, Чебоксары -1991;

IV *Всесоюзного совещания "Автоионизационные явления в атомах"*: Мос-

кВА -1990;

Европейской конференции по (e,2e) столкновениям и связанным проблемам: Брест, Франция -1991;

Международного симпозиума по (e,2e) столкновениям, двойной фотоионизации и связанным процессам: Париж -1993; в журналах; Ученых записках Монгольского госуниверситета, в сообщениях и препринтах ОИЯИ.

Результаты диссертационной работы постоянно по мере их получения обсуждались на семинарах Лаборатории теоретического практикума НИИЯФ МГУ, а также тематической группы Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Помимо того, эти материалы также докладывались на ежегодных конференциях по физике: Улаанбаатар 1988-1993;

Материалы диссертации в форме приглашенных докладов дважды были доложены на международных конференциях: Бухарест -1988 и Брест (Франция) -1991;

По материалам диссертации опубликовано 33 печатных работы, в том числе 19 статей в российских и зарубежных изданиях (журналах, трудах международных конференций, в Ученых записках Монгольского госуниверситета и в сообщениях и препринтах ОИЯИ).

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, двух приложений и заключения общим объемом 185 страниц, включая 61 рисунок, 33 таблицы и список цитированной литературы из 175 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разрабатываемой темы и сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

В первой главе рассматривается теоретический формализм для единого описания прямой и резонансной ионизации атома гелия из основного и возбужденных состояний фотонами и быстрыми электронами на основе диагонализационного метода [2, 3]. Коротко изложен диагонализационный метод и обсуждается вопрос о дальнейшем его применении к исследованию поставленных задач. Приведены выражения для тройных дифференциальных характеристик $He(e,2e)He^{+}$ реакции (в компланарной геометрии) в параметрической форме, в которых учтена интерференция перекрывающихся 1P и 1D АИС.

Интегрированием тройного дифференциального сечения (в лабораторной системе координат) по углам рассеяния выведена новая параметрическая формула для двойного дифференциального сечения (ДДС) эжекции:

$$\frac{d^2\sigma}{dE_b d\Omega_b} = \sum_L \sigma_L^{(2)}, \quad \sigma_L^{(2)} = C_L P_L(\theta_b). \quad (1)$$

Здесь $\sigma_L^{(2)}(E_o, E_b, \theta_b)$ - мультипольное сечение эжекции, L - мультипольный угловой момент, $P_L(\theta_b)$ - полином Лежандра. Угловые коэффициенты C_L в (1) определяются как

$$C_L^i = C_L^{(2)} + C_L^P + C_L^D + C_L^i, \quad (2)$$

где $C_L^{(2)}$ и C_L^i - мультипольные коэффициенты, определяющие прямой процесс и интерференцию 1P и 1D АИС соответственно. Коэффициенты C_L^P и C_L^D определяются "своими" резонансными параметрами $a_{L,j}$ и $b_{L,j}$:

$$C_L^j = \frac{a_{L,j}\epsilon_j + b_{L,j}}{\epsilon_j^2 + 1} \quad j = 1; 2 \text{ т.е. для } ^1P \text{ и } ^1D \text{ АИС.} \quad (3)$$

Здесь $\epsilon_j = 2(E - E_{res}^j)/\Gamma_j$; E_{res}^j и Γ_j - положение и ширина j -го резонанса. Из формул (1)- (3) видно, что профиль 1P и 1D АИС в сечении дополняется информацией об эволюции вкладов профилей в мультипольных сечениях.

Мультипольное сечение фотопроцесса, учитывающее проявление "протяженной структуры" μ - го АИС записывается:

$$\sigma_{\mu L}^i(E) = \sigma_L^{i(o)}(E) + \sigma_L^{i(o)} \frac{[q_{\mu L}^i(E) + \epsilon_{\mu L}(E)]^2}{1 + \epsilon_{\mu L}^2(E)}, \quad (4)$$

где $\sigma_L^{i(o)}(E)$ - мультипольное сечение прямого фотоперехода в открытый канал;

$$\epsilon_{\mu L} = 2(E - E_{\mu L})/\Gamma_{\mu L}(E); \quad (5)$$

$\Gamma_{\mu L}(E)$, $q_{\mu L}^i(E)$ - функции ширины и профильного индекса в данном мультипольном канале, $E_{\mu L}$ - положение АИС (L).

Приводятся формулы для доли вклада ионизации через АИС по отношению к мультипольному сечению в открытый канал, а также сечения рекомбинации иона на выстроенное состояние атома гелия.

Вторая глава посвящена изложению основных результатов исследований прямой и резонансной ионизации атома гелия быстрыми электронами.

Получены оценки различных характеристик прямых (e,2e)- процессов и дана интерпретация экспериментов [5, 6, 7], выполненных в достаточно широкой области кинематических переменных.

Проведены комплексный анализ и численная демонстрация того, при каких кинематических условиях совпадают (e,2e)- реакции, а также угловые и энергетические распределения электронов эжекции могут быть описаны с большой точностью расчетами в ПБП. Показано, что расчеты хорошо описывают совпадающие (e,2e)- реакции при энергиях падающего электрона $E_o \geq 4$ кэВ, а для $E_o \geq 500$ эВ - угловое и энергетическое распределения электрона эжекции для определенных условий кинематики. Для электронов эжекции дана детальная интерпретация экспериментов, в которых наряду с угловым (см., например, рис. 2) и энергетическим распределениями измерались и мультипольные коэффициенты. В результате этого, в частности, выяснено, что с возрастанием энергии падающего электрона (от 200 до 2000 эВ) при малых энергиях эжекции ($E_b \simeq 2$ эВ) в угловом распределении электронов эжекции согласное с коэффициентом асимметрии $\beta_2(E_o, E_b)$ является доминирующим и меняет знак.

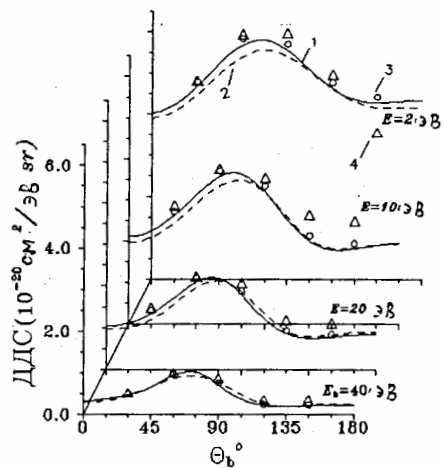


Рис. 2. ДДС как функция от угла эжекции θ_b при энергии падающего электрона $E_0 = 1 \text{кэВ}$. 1- настоящий расчет; 2- полуэмпирические оценки [9]; 3- эксперимент [6]; 4- расчет [8].

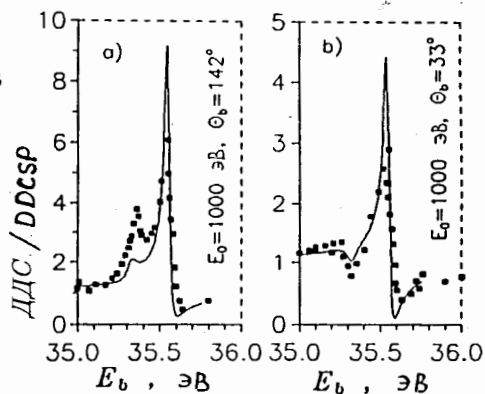


Рис. 3. Спектр эжекции в окрестности $1D$ и $1P$ АИС при $E_0 = 1 \text{кэВ}$ и $\theta_b = 33^\circ$ и 142° . ДДС поделено на его значение в положении $1P$ АИС (DDCSP). Черные квадратики - эксперимент [7]. Сплошная линия - настоящий расчет.

Далее проведен анализ результатов расчета для $1P$ и $1D$ АИС с полным учетом их интерференции и перекрытия при различных условиях кинематики. Приведено большое число расчетных данных в виде рисунков и таблиц, иллюстрирующих структуры АИС, проявляющихся как в спектрах совпадения, так и в спектрах эжекции, а также интенсивности взаимодействия этих АИС, интерференции амплитуд, перекрытия и вариации соотношений их выходов в широкой области кинематики. Подробно рассмотрен вопрос о профилях резонансных структур в мультипольных сечениях эжекции, что дает гораздо более богатую и подробную информацию о механизме формирования, распада и взаимодействия $1P$ и $1D$ АИС. В результате мультипольного описания резонансной структуры дана интерпретация эксперимента, в котором были сняты спектры взаимодействующих $1P$ и $1D$ при углах эжекции 33° и 142° с высокой точностью (см. рис. 3). Обсуждается также вопрос о выборе специфических условий кинематики, при которых выходы рассматриваемых автоионизационных состояний могут быть измерены раздельно.

Рассмотрен вопрос о чувствительности тройных дифференциальных характеристик $\text{He}(e, 2e)\text{He}^+$ - реакции к различным моделям структуры мишени на основе сравнения с прецизионными данными совпадательного эксперимента [5], проведенного при высоких энергиях налетающего электрона.

Глава 3 посвящена изложению результатов расчетов прямой и резонансной

фотоионизации возбужденного атома гелия, а также углового распределения вторичных фотонов из возбужденного атома гелия в электронно-ионной рекомбинации.

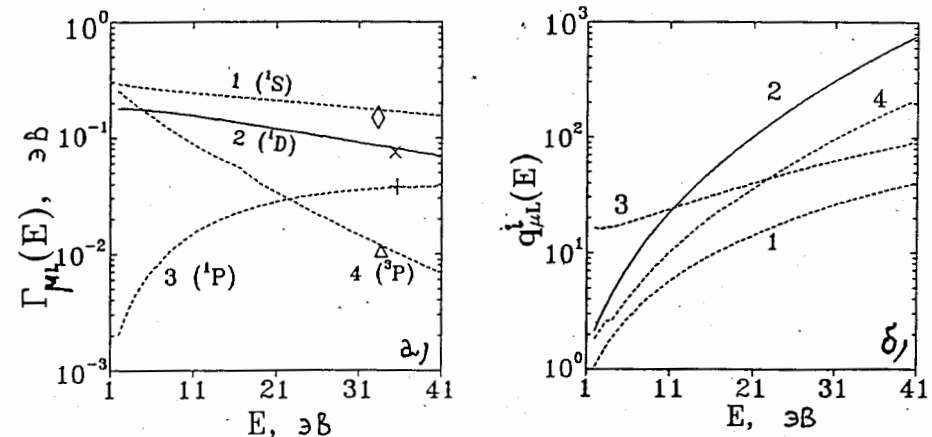


Рис. 4. Энергетическая зависимость функций ширины $\Gamma_{\mu L}(E)$ и профильного индекса $q_{\mu L}^i(E)$. Цифры 1, 2, 3 и 4 соответствуют фотоионизации $\text{He}(2^1P)$, $\text{He}(2^1S)$ и $\text{He}(2^3S)$ атомов с возбуждением $1S$, $1D$, $1P$ и $3P$ АИС соответственно. Экспериментальные точки для ширины в точках резонанса \diamond , \times , Δ и $+$ взяты из работы [10] (рис. 4а). На рис. 4б кривые 1 и 4 соответствуют значениям $[-q_{\mu L}^i(E)]$.

Показано, что при фотоионизации атома гелия из возбужденных состояний профили одних и тех же резонансов в континууме могут проявиться качественно по-иному, нежели в процессе фотоионизации основного состояния. Показано, что резонансная структура проявляется в широкой области спектра, простирающейся на сотни естественных ширин от положения АИС. При энергиях электрона $E \geq 0.5 \text{ а.е.}$, где очень мало мультипольное сечение прямого фотоперехода из возбужденных состояний вдали от положения резонансов, ионизация через АИС становится существенно заметной. Наши расчеты показывают, что при $E = 1 \text{ а.е.}$ на расстояниях 6.1 и 8.24 эВ от положений первых $1D$ и $1S$ АИС (энергии АИС равны 60.05 эВ и 57.90 эВ соответственно) вклады в сечения ионизации через АИС составляют 91.2% и 75.6 % соответственно. Функции ширины и профильного индекса для "протяженных профилей" резонансов в сечении процесса приведены на рис. 4а и 4б. Видно, что функции профильного индекса принимают большие по абсолютной величине, значения (см. рис. 4б). Выявлено подобное же поведение резонансной структуры и в обратном процессе - в рекомбинации на возбужденный уровень атома гелия. Выяснено, что природа формирования "протяженных структур" связана с интерференцией прямых переходов и переходов через АИС с

функцией профильного индекса больших абсолютных значений.

Получена формула для энергетической зависимости коэффициента угловой анизотропии вторичного фотона, следующего за рекомбинацией $\Lambda^+ + e$, которая в частном случае иона в S -состоянии ($L_0 = 0$) с образованием возбужденного P -состояния ($L_1 = 1$) атома и с учетом двух близко лежащих АИС, имеющих моменты $L_1^0 = 0$ и $L_2^0 = 2$, равна:

$$\beta_\gamma = \frac{\Lambda[(\epsilon_0 \epsilon_2 + 1) \cos(\delta_0 - \delta_2) + (\epsilon_2 - \epsilon_0) \sin(\delta_0 - \delta_2) + \xi]}{R_0^2(\epsilon_2^2 + 1)(q_0 + \epsilon_0)^2 + R_2^2(\epsilon_0^2 + 1)(q_2 + \epsilon_2)^2}, \quad (6)$$

где

$$\Lambda = \sqrt{2} R_0 R_2 (q_0 + \epsilon_0)(q_2 + \epsilon_2),$$

$$\xi = \frac{1}{2} R_0^2 (\epsilon_0^2 + 1)(q_2 + \epsilon_2)^2.$$

Показано, что угловые распределения вторичных фотонов γ_2 , испускаемых из выстроенного атома $\text{He}(2^1P)$, образованного в процессе электронно-ионной рекомбинации, носят четко выраженный резонансный характер (см. рис. 5). Большое внимание уделяется изучению проявления закрытого канала в процессах фото-рекомбинации. Показано, что влияние автоионизационного резонанса особенно сильно проявляется в безразмерных характеристиках процесса: коэффициентах угловой анизотропии фотоэлектрона β_2 при фотоионизации и вторичных фотонов в рекомбинации β_γ (см. рис. 5). При этом, как правило, формируется уширенная структура резонанса, сильно смещенная в сторону малых энергий.

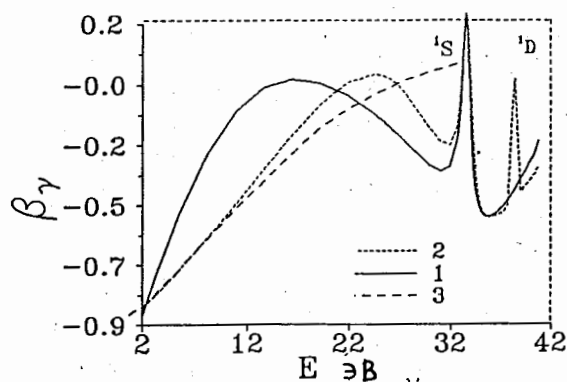


Рис. 5. Энергетическая зависимость коэффициента угловой анизотропии вторичных фотонов $\beta_\gamma(E)$ из 2^1P состояния гелия в рекомбинации ($e + \text{He}^+$). Расчеты проведены в резонансном приближении (сплошная кривая) и с учетом энергетической зависимости функций ширины и профильного индекса (пунктир).

Обсуждаемые выше резонансы представляют интерес с точки зрения экспериментального изучения эффекта проявления автоионизационных резонансов в области прямых переходов при фотоионизации возбужденного атома, если принимать во внимание, что ныне успешно проводятся прямые измерения сечений элементарного акта рекомбинации на атоме гелия. Предлагается возможный вариант

экспериментального измерения функций ширины и профильного индекса с использованием мишеней поляризованных атомов и поляризованного пучка фотонов.

В главе 4 рассматриваются неупругие столкновения медленных отрицательных мюонов и адронов с метастабильными атомами водорода и гелия. Дан краткий обзор современных теоретических подходов к этой проблеме, развитых для столкновений с малоэлектронными системами (H, He, H_2), а также достижений последних лет в экспериментальных [12] и теоретических исследованиях [4] долгоживущих адронных состояний в гелии. Далее обсуждается проблема взаимодействия частиц M^- с атомами H и He в метастабильных $2S$ -состояниях.

Приведены необходимые для дальнейшего основные положения полуклассического приближения в задаче о связи уравнений двух- и трехчастичных каналов. Неупругие $M^- - H(2S)$ столкновения рассмотрены в этом приближении с использованием как адиабатического, так и диабатического базисов. Расчеты дают качественно одинаковые результаты в обоих базисах. Эта методическая задача, в принципе, дает основание для применения подхода к решению задачи о связи двух- и трехчастичных каналов с использованием диабатического базиса в изучении столкновений частиц M^- с метастабильными атомами гелия. В качестве базиса взяты линейные комбинации атомных волновых функций, исключая дипольный член из связи двухчастичных каналов. Для атома H аналогичные комбинации соответствуют "штарковским" состояниям $|n n_1 n_2 m\rangle$.

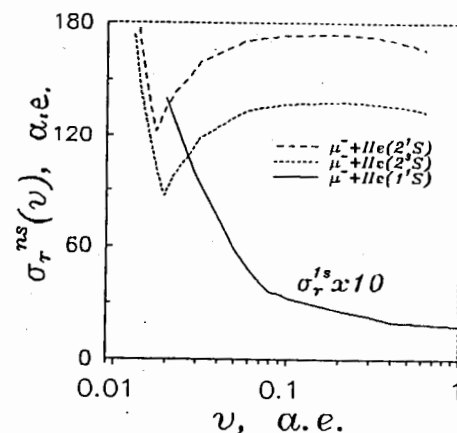


Рис. 6. Сечения реакции для столкновений отрицательного мюона с атомом He в состояниях 1^1S (сплошная кривая), 2^1S (штриховая кривая) и 3^1S (пунктир).

Для обеих мишеней термы $|2100\rangle(01)$ и $|2010\rangle(10)$ выходит в континуум на значительно больших расстояниях ($\sim 5-10$ а.е.), чем терм основного состояния (~ 1 а.е.). Эти расстояния играют роль радиуса неупругого взаимодействия (R_ν). Рассчитаны сечения ионизации и кулоновского захвата, а также кинетические характеристики для частиц в среде, содержащей метастабильные атомы. Сечение реакции в канале (10) обращается в нуль при энергии $E \leq E_1$, где E_1 - высота барьера терма 10 ($E_1 \approx 0.03$ а.е. для H и 0.04 а.е. для триплетного He). В другом

канале терм не содержит барьера, поэтому сечение реакции растет с уменьшением энергии. В результате сечение захвата частицы метастабильным атомом σ_{2S} имеет провал вблизи $E = E_1$. В целом сечение неупругого взаимодействия превышает аналогичное сечение для захвата в основном состоянии более чем на порядок (см. рис. 6). Для гелия неупругое сечение заметно зависит от спина состояния.

Кинетические характеристики для среды из атомов в метастабильных состояниях существенно отличаются от аналогичных величин для атомов в основном состоянии. Время замедления антипротонов в гелии при 100 %-й концентрации метастабильных атомов гелия уменьшается почти на порядок. Распределение захваченных частиц по главному квантовому числу ρ_{nl} сдвинуто в сторону больших n ($n \geq \sqrt{M/2I}$, где для триплетного метастабильного атома He потенциал ионизации $I = 0.175$ а. е., тогда как для основного состояния $I = 0.904$ а. е.). Распределение по l имеет более сложный вид, чем при захвате атомом в $1S$ - состоянии.

Распределение по орбитальному моменту можно представить в виде

$$\rho_{nl} = \rho_n \tilde{\rho}_{nl}, \quad (7)$$

причем $\tilde{\rho}_{nl}$ содержит вклады от двух каналов ($\nu = 01$ и 10):

$$\tilde{\rho}_{nl} = \frac{1}{2} \sum_{\nu} \frac{2l+1}{(l_n^{\nu}+1)^2} \Theta(l_n^{\nu} - l). \quad (8)$$

Максимальный угловой момент частицы в образовавшемся экзотическом атоме определяется как проявление максимальных прицельных параметров неупругого взаимодействия $b_{\nu}(E)$ в двух каналах (10), (01), для каждого из которых максимальный момент представляется формулой

$$l_n^{\nu} = \min\left\{(n-1), \text{Entier}\left(-\frac{1}{2} + \sqrt{2\mu R_{\nu}^2 [E_{nl} - E_{\nu} + (U_{\nu}(R_{\nu}) - U_{\nu}(\infty))]\right)}\right\}. \quad (9)$$

Здесь E_{nl} и E_{ν} - энергия образовавшегося экзотического атома и энергия начального (метастабильного) атома He, $U_{\nu}(R)$ - терм двухчастичного канала ν .

Показано, что при захвате антипротона метастабильным атомом He могут заселяться круговые орбиты со значениями главного квантового числа вплоть до $n \sim 150$, которые не заселяются при захвате невозбужденным атомом. Поэтому использование метастабильной гелиевой мишени для получения метастабильных экзотических атомов могло бы значительно расширить область изучаемых долгоживущих адронных состояний.

Личный вклад автора.

В диссертацию включены результаты, полученные лично автором, а также результаты, в получение которых автор внес определяющий вклад на этапах постановки задач, развития формализма, создания математического обеспечения, проведения расчетов, анализа и представления полученных результатов.

Цитируемая литература

- [1] Fano U. *Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts.* - *Phys. Rev.*, 1961, V. 124, P.1866-1878.
- [2] Балашов В.В., Гришанова (Страхова) С.И., Круглова И.И., Сенашенко В.С. *Резонансная фотоионизация гелия и гелиеподобных ионов.* - *Оптика и спектроскопия*, 1970, Т. 28, С. 859-868.
- [3] Балашов В. В., Липовецкий С. С., Сенашенко В. С. *О едином описании профиля резонансных линий в энергетических спектрах рассеянных и испускаемых электронов.* - *ЖЭТФ*, 1972, Т. 63, С. 1623-1627.
- [4] Dolinov V.K., Korenman G.Ya., Moskalenko I.V. and Popov V.P., *Atomic capture of negative muons and Hadrons in He.* - *Muon Catalyzed Fusion*, V.4, 1989, P. 169-175.
- [5] Duguet A., Cherid M., Lahmam-Bennani A., Franz A. and Klark M. *High-accuracy (e, 2e) cross sections for helium: reference data in the first Born approximation.* - *J. Phys.B*, 1987, V. 20, P. 6145-6156.
- [6] Goruganthu R.R. and Bonham R.A. *Secondary- electron production cross sections for electron- impact ionization of helium.* - *Phys. Rev.A*, 1986, V. 34, P. 103-126.
- [7] Oda N., Nishimura F., Tahira S. and Koike F. *Energy and angular distributions of electrons ejected from autoionization states in helium by electron impact.* *Phys. Rev. A*, 1977, V. 15, P. 574-587.
- [8] Bell K.L. and Kingston J. *The angular distributions of electrons ejected in the ionization of helium atoms by protons and electrons.* - *Phys. B, At. Mol. Phys.*, 1975, V. 8, P. 2666-2678.
- [9] Kim Yong-Ki. *Angular and energy distributions of secondary electrons from helium. Slow electrons ejected by electron impact.* - *Phys. Rev. A*, 1983, V. 28, P.656-666.
- [10] Peter J. Hicks P. J. and John Comer. *Ejected electron spectroscopy of autoionizing states excited by low energy electron impact.* - *J. Phys. B, At. Mol. Phys*, 1975, V. 11, P. 1866-1879.
- [11] Yamazaki T., Widmann E., Hayano R.S. et al. *Formation of long-lived gas-phase antiprotonic Helium atoms and quenching by H₂.* - *Nature*, 361, 1993, P. 238
- [12] Коренман Г. Я., Юдин С. Н. *К теории образования и распада метастабильных состояний каонного атома гелия.* - *Письма в ЖЭТФ*, 58, 1993, с. 10-14.

Основные результаты опубликованы в работах

- [1]. Бадамдамдин Р., Лхагва О., Страхова С. И., Хэнмэдэх Л. *Тройные дифференциальные обобщенные силы осциллятора в резонансной He(e, 2e)He⁺ реакции.* Тезисы IV Всесоюзного совещания: "Автоионизационные явления в атомах". Москва, 11-13 декабря 1990, с. 11-12.

[2]. Lhagva O., Badamdanddin R., Strakhova S.I., Hehnmedeh L. *Triple differential generalized oscillator strengths in the resonance He(e,2e)He⁺ reaction*. - *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys*, 1991, V. 24, pp. 4249- 4261.

[3]. Lhagva O. *Triple differential generalized oscillator strength of direct and resonance He(e,2e)He⁺ reaction at high incident energies*. - *Z. Phys. D- Atoms, Molecules and clusters*, 1992, V. 23, P. 321- 331.

[4]. Lhagva O., Badamdanddin R., Strakhova S.I., Hehnmedeh L. *Triple differential generalised oscillator strengths in the resonance He(e,2e)He⁺ reaction*. Abstracts of contributed papers, XVII ICPEAC, Ed. McCarthy I. E, MacGillvry W. R., Standage M. C, Brisbane, Australia, 1991, p. 198.

[5]. Амирханов И. В., Лхагва О., Москаленко И. В., Хэнмэдэх Л. *Обобщенные силы осциллятора и сечения асимметричной He(e,2e)He⁺ реакции в различных моделях структуры атома гелия*. Препринт ОИЯИ, P4- 89- 384, Дубна 1989.

[6]. Amirkhanov I. B., Lhagva O., Moskalenko I. B., Hehnmedeh L. *Generalised oscillator strengths and cross sections of asymmetric He(e,2e)He⁺ reactions in different structure models of the Helium atom*. XVII International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC), 1989, New York, p. 358.

[7]. Амирханов И. В., Лхагва О., Москаленко И. В., Хэнмэдэх Л. *Обобщенные силы осциллятора и сечения асимметричной He(e,2e)He⁺ реакции в различных моделях структуры атома гелия*. - *Оптика и Спектроскопия*, 1990, т.69, с. 1212- 1218.

[8]. Лхагва О., Страхова С.И., Бадамдамдин Р., Хэнмэдэх Л. *Прямая и резонансная ионизация гелия быстрыми электронами*. Тезисы докладов, XI Всесоюзная конференция по физике электронных и атомных столкновений (XI ВКЭАС), 25-28 июня 1991, Чебоксары, с. 16.

[9]. Lhagva O., Hehnmedeh L. *The double differential cross section for the He(e,2e)He⁺ reactions in the first Born approximation*. Abs. of contrib. papers: *International Symposium on (e,2e) collisions, Double photoionization and related processes* Paris, France, 1993, 15-17 July, P. 11.

[10]. Lhagva O. *Double differential cross section for the He(e,2e)He⁺ reactions in the first Born approximation*. Abs. of contrib. paper XVIII ICPEAC (Ed. Andersen I, Fastrup B, Folkmann F, Knudsen). Aarhus University Denmark, 1993, P. 220.

[11]. Лхагва О., Хэнмэдэх Л. *Угловое и энергетическое распределения эжектируемых электронов при ионизации атома гелия электронным ударом*. Сообщение ОИЯИ, P4-93-200 Дубна, 1993.

[12]. Lhagva O., Hehnmedeh L. *Angular and energy distributions of ejected electrons in the direct and resonance He(e,2e)He⁺ reactions*. - *J. Phys. B, At. Mol. Phys.*, 1994, V. 27, P. 4623- 4641.

[13]. Грум-Гржимайло А. Н., Данзан С., Лхагва О., Страхова С.И. *Резонансы в угловом распределении вторичных фотонов из возбужденного атома в (e+A⁺) рекомбинации*. - Препринт ОИЯИ, P4-88-5, Дубна, 1988.

[14] Grum-Grzhimailo A. N., Danzan S., Lhagva O. and Strakhova S.I. *Resonances in angular distribution of secondary photons from an excited atom in the*

(e + A⁺) recombination. Spectroscopy and collisions of few-electron ions. Proceedings of the Study Conference SCOFEI'88, Ed. Marin Ivascu et al. World Scientific Singapore, 1989, pp. 284- 303.

[15]. Lhagva O., Hehnmedeh L., Danzan S. *On the description of the ejection spectra in the He(e,2e)He⁺ reactions*. Abs. of contrib. paper XVIII ICPEAC (Ed. Andersen I., Fastrup B., Folkmann F., Knudsen H). Aarhus University Denmark, 1993, pp. 219.

[16]. Данзан С., Жадамба Б., Лхагва О., Страхова С.И., Сухбаатар Ц. *Использование многоконфигурационного метода Хартри-Фока в задаче фотоионизации атома гелия*. XI Всесоюзная конференция по физике электронных и атомных столкновений (XI ВКЭАС), 25-28 июня 1991, Чебоксары, с. 16.

[17]. Danzan S., Zadamba B., Lhagva O., Strakhova S.I., Suhbaatar C. and Hehnmedeh L. *The electron correlations in the photoionization from the helium excited states*, Abs. of contrib. paper XVIII ICPEAC (Ed. Andersen I., Fastrup B., Folkmann F., Knudsen H). Aarhus University Denmark, 1993.

[18]. Данзан С., Жадамба Б., Лхагва О., Страхова С.И., Сухбаатар Ц. *Прямая фотоионизация возбужденного гелия*. - *Сообщение ОИЯИ*, P4-93-198, Дубна, 1993.

[19]. Страхова С.И., Лхагва О., Данзан С., Жадамба Б., Хэнмэдэх Л. *Теоретические основы метода Хартри-Фока*. Труды МонГПИ, Улан-Батор, 1985, т.19, с. 137- 157.

[20]. Лхагва О., Страхова С.И., Бадамдамдин Р., Хэнмэдэх Л. *Выход резонансов в He(e,2e)He⁺ реакции в зависимости от угла эжекции*. - *Сообщение ОИЯИ*, P4-91-129, Дубна, 1991.

[21]. Lhagva O., Badamdanddin R., Strakhova S.I., Hehnmedeh L. *The Yields of ¹P and ¹D Resonances in the He(e,2e)He⁺ reaction*. *JINR preprint*, E4-91-303, Dubna, 1991.

[22]. Lhagva O., Badamdanddin R., Strakhova S.I. *The yields of the ¹P and ¹D resonances in He(e,2e)He⁺ reaction*. Abstracts of contributed papers, XVII ICPEAC, Ed. McCarthy I. E, MacGillvry W. R., Standage M. C., Brisbane, Australia, 1991, p.181.

[23]. Lhagva O., Badamdanddin R., Strakhova S.I., Hehnmedeh L. *The yields of the ¹P and ¹D resonances in He(e,2e)He⁺ reaction*. - *Z. Phys. D, Atoms, Molecules and clusters*, 1993, 27, pp. 259 -262.

[24]. Данзан С., Жадамба Б., Лхагва О., Страхова С.И., Сухбаатар Ц. *Резонансная фотоионизация возбужденного гелия*. - *Сообщение ОИЯИ*, P4-93-199, Дубна, 1993.

[25]. Lhagva O., Danzan S., Strakhova S.I. *Peculiarities of excited Helium photoionization*. - *JINR preprint*, E4-94-12, Dubna, 1994. - *Phys. Rev. A*, 1995 (in press).

[26]. Danzan S., Zadamba B., Lhagva O., Strakhova S.I., Suhbaatar C. and Hehnmedeh L. *The resonance of photoionization characteristics from the helium excited states*. Abs. of contrib. paper XVIII ICPEAC (Ed. Andersen I., Fastrup B.,

Folkmann F., Knudsen H). Aarhus University Denmark, 1993.

[27]. Лхагва О., Жадамба Б., Хэнмэдэх Л., Наранцацралт Н., Грум-Гржимайло А. Н., Страхова С. И. *Угловые распределения фотонов при фоторекомбинации и диэлектронной рекомбинации на возбужденные состояния с последующей флуоресценцией*. - *Ученые записки МонГУ*, 1986, т.94, С. 105- 110.

[28]. Грум-Гржимайло А. Н., Данзан С., Лхагва О., Страхова С. И. *Резонансы в угловом распределении вторичных фотонов из возбужденного атома в $(e + A^+)$ рекомбинации*. X Всесоюзная конференция по физике электронных и атомных столкновений (ВКЭАС). Тезисы докладов, Ужгород, 1988, Т.1, с. 55.

[29]. Grum-Grzhimailo A. N., Danzan S., Lhagva O. and Strachova S. I. *Resonances in the angular distribution of secondary photons from an excited atom in the $(e + A^+)$ recombination*. Abstracts of the International Conference on Spectroscopy and collisions of few- electron ions. Bucharest, Romania, August 29-September 2, 1988, pp. 21- 22.

[30]. Grum-Grzhimailo A. N., Danzan S., Lhagva O. and Strakhova S. I. *Resonances in angular distribution of secondary photons from an excited atom in the $(e + A^+)$ recombination*. - *Z. Phys. D, Atoms, Molecules and clusters*, 1989, 18, pp. 147- 152.

[31] Коренман Г. Я., Лхагва О. *Collisions of negative muons and hadrons with metastable atoms*. Book of abstracts of International Conference: *Mesons and nuclei at intermediate energies*, Dubna, Russia, May 1994, p. 58.

[32]. Коренман Г. Я., Лхагва О., Цоохуу Х., Бадамдамдин Р. *Неупругие столкновения медленных отрицательных мюонов и адронов с метастабильными атомами водорода*. Сообщение ОИЯИ, Р4- 94- 143, Дубна, 1994.

[33]. Коренман Г. Я., Лхагва О., Цоохуу Х. *Неупругие столкновения медленных отрицательных мюонов и адронов с метастабильными атомами гелия*. Сообщение ОИЯИ, Р4- 94- 146, Дубна, 1994.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 марта 1995 года.