

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

На правах рукописи



Летунов Андрей Юрьевич

**УЧЁТ ЭФФЕКТОВ ИОННОЙ ДИНАМИКИ В ЗАДАЧАХ
ТЕОРИИ УШИРЕНИЯ**

Специальность 1.3.3 – «Теоретическая физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: Лисица Валерий Степанович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
курчатовского комплекса термоядерной
энергетики и плазменных технологий
НИЦ Курчатовского института

Официальные оппоненты: Виноградов Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
Физического института им. П. Н. Лебедева РАН;

Дьячков Лев Гаврилович ,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Теоретического отдела
Объединенного института высоких температур РАН;

Коновалов Вениамин Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
Института прикладной математики РАН им. М. В. Келдыша.

Защита состоится 26 июня 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МИФИ.1.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 ____ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.04,
доктор физико-математических наук, доцент



Маслов М.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертационной работы

Анализ электромагнитного излучения плазмы является зачастую наиболее информативным, удобным, а иногда и единственно возможным методом диагностики плазмы. Действительно, введение в плазменную среду зондов, даже если присутствует такая техническая возможность, может повлиять на параметры плазмы, тем самым искажая измерения. Для астрофизических приложений спектроскопическая диагностика является наиболее доступным методом исследования космических объектов [1–5], альтернативами которому являются только анализ спектров космических лучей [6, 7] и нейтринная астрономия [8–10]. Одним из широко используемых методов плазменной спектроскопии является измерение формы спектральных линий, то есть зависимости интенсивности от частотного сдвига для перехода между двумя связанными состояниями атома или иона [11–13]. На форму профиля спектральных линий в плазме, как правило, влияют два основных механизма уширения [11, 14]. Первый — доплеровское. Из-за движения частиц в плазме излучение, которое регистрирует измерительный прибор, изменяется за счет эффекта Доплера. Однако, в большинстве случаев этот эффект описывается тривиальным образом [15]. Исключением является случай, когда частица испытывает частые столкновения с другими частицами, а частота столкновений много больше доплеровского сдвига (эффект Дикке). Этот случай подробно рассмотрен в работе [16]. Второй механизм, который вносит существенный вклад в формирование профиля спектральной линии в плазме — штарковское уширение. Плазма состоит из заряженных частиц — ионов и электронов, которые создают электрическое микрополе в плазме. Энергетические уровни атомов и ионов, находящихся в электрическом поле, сдвигаются. Это приводит к изменению формы спектральной линии в плазме.

Таблица 1: Примеры физических систем, для изучения которых используется анализ формы спектральных линий

Тип плазмы	Температура, эВ	Концентрация частиц, см ⁻³
Термоядерная плазма токамака	~1000	10 ¹³ –10 ¹⁷
Плазма в диверторе токамака	~1	10 ¹³ –10 ¹⁷
Плотная лазерная плазма	~100–1000	10 ²⁰ –10 ²⁴
Плазма в дуговом разряде	~1	10 ¹⁶ –10 ¹⁹
Плазма в межзвездных туманностях	~0.1–1	10 ³ –10 ⁴

Методы теории уширения спектральных линий применяются для изучения плазмы в чрезвычайно широком диапазоне плотностей и температур. В Таблице 1 представлен ряд примеров физических систем, для которых применяется данный подход. Во-первых, анализ формы спектральных линий часто используется для диагностики плазмы в установках с магнитным удержанием. Если речь идет об активной зоне токамака, где температуры достигают порядка 1 кэВ, то измеряется сигнал от светящейся примеси какого-нибудь многоэлектронного иона [17–19]. В диверторе токамака температуры существенно ниже и поэтому там есть возможность зарегистрировать излучение от нейтрального водорода и его изотопов [20]. Последнее время возобновился интерес к изучению спектров многозарядных ионов и приложениям штарковской спектроскопии в экспериментах на мощных лазерах, в которых достигаются высокие температуры порядка 1 кэВ при твердотельных плотностях исследуемых образцов [21]. В частности, измерения профилей линий многозарядных ионов (МЗИ) используются для диагностики плазмы на установке NIF [22, 23]. Большой интерес как среди астрономов, так и среди теоретиков, занимающихся штарковской теорией уширения спектральных линий, вызывает изучение радиолиний нейтрального водорода, излучаемых ридберговскими атомами в межзвездных туманностях [24–26]. Главные квантовые числа в таких условиях могут иметь большие значения, в сравнении с лабораторной плазмой: $n \simeq 100$ –200. В частности, известной проблемой в этой области является парадокс, связанный с уменьшением ударной ширины с ростом главного квантового числа [24, 27]. Данное явление было зарегистрировано в туманности Орион. Этот парадокс до сих пор не имеет общепризнанного теоретического объяснения [28, 29].

При описании штарковского уширения возникает ряд принципиальных трудностей. Во-первых, плазменное микрополе, очевидно, изменяется во времени из-за теплового движения частиц. Из-за различия характерных скоростей электронов и ионов вклад в уширение от первых принято описывать в пределе высоких скоростей (ударное приближение), а от вторых—в пределе малых скоростей (квазистатическое приближение) [11, 14]. Данный подход в научной литературе принято называть стандартной теорией [29]. Для электронов ударное приближение обычно хорошо работает [14], а вот для ионов условия применимости квазистатического приближения довольно часто нарушаются [30]. Задачу описания влияния теплового движения ионов в плазме на штарковское уширение принято называть проблемой ионной динамики (ИД) [29, 31–33]. При этом последовательной теории учета вклада теплового движения ионов в уширение спектральных линий на данный момент нет. Однако, существует ряд феноменологических моделей, позволяющих приближенно учитывать эффекты ИД. Одним из наиболее точных и простых подходов является модель частотных флуктуаций (FFM — Frequency Fluctuation Model) [34]. Тем не менее, эта модель обладает двумя серьезными недостатками. Первый — это то, что в нее входит параметр — частота скачков ионного микрополя, точное значение которого плохо определено. Кроме этого, FFM в ее оригинальной формулировке не воспроизводит ударный предел. Однако, в рамках настоящей работы проведено детальное исследование FFM и предложены способы устранения указанных недостатков. Во-вторых, существует вычислительная трудность при описании переходов между высоко-возбужденными (ридберговскими) уровнями. Для атома водорода в нерелятивистском приближении количество радиационных переходов растет как $n^2\bar{n}^2$, где n и \bar{n} — главные квантовые числа верхнего и нижнего уровней соответственно. В целях диагностики есть необходимость проводить массовый счет формы спектральных линий, а быстро растущий массив радиационных переходов сильно затрудняет такие расчеты. В-третьих, при описании спектров плазмы в установках с магнитным удержанием теряется симметрия задачи. Если присутствует одно лишь электрическое поле, то можно направить ось квантования z параллельно этому полю, и задача будет осесимметричной. При наличии магнитного поля приходится иметь дело с существенно трехмерной задачей. В-четвертых, при описании спектров многозарядных ионов может иметь место интерференция штарковских состояний [35]. Для решения такой задачи классические ме-

тоды теории уширения спектральных линий не подходят, и возникает необходимость использовать более сложный формализм матрицы плотности [36–39]. Для описания реальных спектров и решения задачи диагностики необходимо одновременно решать сразу несколько указанных проблем. Для этого нужно разрабатывать специфические теоретические методы. В рамках настоящей диссертации детально рассмотрены три задачи, в которых необходимо моделировать профиль спектральных линий с учетом совокупности указанных факторов.

Первая задача связана с моделированием формы спектральных линий для ридберговских переходов нейтрального водорода (водородоподобного иона), находящегося в плазме в постоянном магнитном поле. Данная модель расчета изначально разрабатывалась для теоретического сопровождения метода лазерного индуцированного тушения (ЛИТ) [40], предназначенного для диагностики диверторной плазмы. Метод ЛИТ является альтернативой метода лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [20, 41]. В рамках ЛИФ излучение от определенного перехода усиливают с помощью лазерной накачки. Однако, у ЛИФ есть существенный технический недостаток. Поскольку лазерное излучение накачки и анализируемое плазменное излучение имеют одну и ту же частоту, то регистрируемый сигнал искажается из-за засветки. В методе ЛИТ диагностику плазмы проводят наоборот по ослабленному сигналу. С помощью лазера накачки снижают концентрацию атомов, находящихся на определенном уровне n , а затем анализируют профиль линии перехода $n \rightarrow \bar{n}$. Так, в работе [40] предполагается использовать две схемы: в первой линия накачки реализуется на переходе $n = 4 \rightarrow \bar{n} = 5$, а анализируется линия $n = 4 \rightarrow \bar{n} = 3$; во второй используется линия накачки $n = 3 \rightarrow \bar{n} = 4$, а исследуется переход $n = 3 \rightarrow \bar{n} = 2$. Казалось бы, что указанные значения главных квантовых чисел ($n = 4, 5$) всего в несколько раз больше единицы. Возникает вопрос о том, можно ли считать данные уровни ридберговскими? Ответ на этот вопрос положительный по двум причинам. Во-первых, для переходов с указанных уровней массив радиационных переходов на порядок больше, чем для более маленьких n , что существенно влияет на время конкретных расчетов. Во-вторых, как будет показано в рамках настоящей работы, квазиклассическое приближение для соответствующих переходов работает с высокой точностью.

В методе ЛИТ спектральная ширина лазерного излучения должна быть как минимум в несколько раз меньше спектральной ширины линии поглощения. В то же

время, для выделения линии наблюдения, полоса пропускания интерференционного спектрального фильтра должна быть больше спектральной ширины линии. Чтобы откалибровать лазерные установки для выполнения этих условий, необходимо проводить предварительные оптимизационные расчеты профилей соответствующих спектральных линий. Вычисления формы указанных линий с учетом всех механизмов уширения, существенных для данной области параметров, является сложной задачей из-за относительно больших значений главного квантового числа. Массовый счет подобных спектров с помощью существующих моделей требует очень больших вычислительных ресурсов. В рамках данной работы разработана квазиклассическая модель, позволяющая быстро проводить расчеты формы таких спектральных линий с учетом эффектов ИД. Отметим, что данная модель имеет высокую точность (не хуже 10%) уже для бальмеровских линий, а это значит, что она может применяться для массового счета профиля спектральной линии H_α (переход $n = 3 \rightarrow \bar{n} = 2$), которая широко используется для диагностики плазмы.

Второй системой, рассмотренной в рамках настоящей работы, является плотная лазерная плазма. Представлены результаты моделирования излучения МЗИ. Здесь одновременно учтены интерференция штарковских уровней в рамках формализма матрицы плотности и эффекты ИД с помощью FFM. Последние, как известно, слабо влияют на ширину спектральной линии МЗИ. Однако, форма центральной области таких линий сильно зависит от вклада теплового движения ионов в штарковское уширение [42]. При диагностике плотной плазмы только по ширине, как правило, погрешность в определении плотности и температуры составляет порядка 50–100% (см., например, [21]). Учет формы центрального участка спектральных линий МЗИ (например, линий с провалом) может существенно улучшить точность диагностики.

В настоящей работе рассмотрены спектры нейтрального водорода, полученные в опытах на электрической дуге. Это сделано для проверки разработанной в рамках настоящей работы модели для учета эффектов ИД. Сравнение расчетов было с результатами известных экспериментов Визе [43, 44].

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось построение теоретических моделей для расчета профилей интенсивности излучения ридберговских атомов водорода и его

изотопов в условиях дивертора токамака с учетом теплового движения ионов, а также для описания влияния эффектов ионной динамики на спектры многозарядных ионов в плотной плазме. Для этого были решены следующие задачи:

1. Упрощен массив радиационных переходов для спектральных серий $H_{n\alpha}$ ($\Delta n = 1$) и $H_{n\beta}$ ($\Delta n = 2$) ридберговского атома водорода, находящегося в скрещенных электрическом и магнитном полях;
2. Получены универсальные квазиклассические формулы для дипольных матричных элементов для атома водорода, который находится в скрещенных электрическом и магнитном полях;
3. Проведена оценка точности полученных квазиклассических формул с помощью сравнения спектров интенсивности, рассчитанных по средствам точных выражений и полученных универсальных квазиклассических формул;
4. Построена теоретическая модель для расчета профилей спектральных линий нейтрального водорода в условиях диверторной плазмы с учетом эффектов ионной динамики;
5. Проведена модификация процедуры FFM, которая заключается в том, чтобы учесть зависимость частоты скачков ионного микрополя от величины этого микрополя;
6. Предложен метод вычисления средней (по микрополю) частоты скачков для совокупности штарковских компонент;
7. Разработан метод для одновременного использования формализма матрицы плотности и процедуры FFM для расчета спектров МЗИ.

Научная новизна работы

Диссертация содержит описание законченного исследования, научная новизна которого заключается в следующем:

1. Для спектральных линий, которые соответствуют переходам между уровнями с разностью главных квантовых чисел равной 1 (спектральная серия $H_{n\alpha}$) и 2

(спектральная серия $H_{n\beta}$) в квазиклассическом приближении получены формулы для вероятностей радиационных переходов в атоме водорода (водородоподобном ионе), находящемся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Продемонстрировано, что в квазиклассическом приближении формулы для вероятностей радиационных переходов имеют универсальный вид для фиксированного значения разностей главных квантовых чисел верхнего и нижнего уровней. Показано, что точность этих формул не хуже 10% уже для серии Бальмера. Скорость вычислений при этом возрастает в сотни раз;

2. Показано, что уже для серии Бальмера (переходы на уровень с главным квантовым числом, равным 2) использование универсальных квазиклассических формул позволяет воспроизвести основные характеристики профиля спектральной линии (ширина линии, положение пиков и провалов) для водорода и его изотопов в условиях диверторной плазмы;
3. С помощью аналитических расчетов впервые продемонстрировано, что учет зависимости частоты скачков ионного микрополя от величины микрополя позволяет воспроизвести ударный предел в рамках процедуры FFM;
4. С помощью стохастической теории С. Чандрасекара и Дж. фон Неймана получены формулы для расчета средней частоты скачков ионного микрополя, которая входит в FFM;
5. Впервые процедура FFM использована совместно с формализмом матрицы плотности для расчета формы спектральной линии.

Практическая ценность диссертации

В рамках данного диссертационного исследования предложены методы и алгоритмы расчета формы спектральных линий в плазме с учетом эффектов ионной динамики для широкого диапазона плотностей и температур. Например, разработан метод расчета профилей водородных спектральных линий с учетом комбинированного эффекта Штарка-Зеемана для переходов между ридберговскими уровнями. Данный подход может успешно использоваться в рамках метода диагностики диверторной плазмы ЛИТ, в котором задействованы переходы $4 \rightarrow 3$ и $5 \rightarrow 4$. Кроме этого, даже

для первых бальмеровских линий погрешность данного приближения составляет менее 10%, а это значит, что он может быть использован для широко распространенной диагностики плазмы по спектральной линии H_{α} . Также в данной работе представлен способ одновременного учета эффектов ионной динамики с помощью процедуры FFM и интерференции штарковских состояний (в рамках формализма матрицы плотности). Это позволяет точнее описывать центральный участок линий многозарядных ионов, что может быть очень существенно для диагностики плотной лазерной плазмы.

Достоверность полученных результатов

Универсальные формулы для дипольных матричных элементов, полученные в рамках настоящей работы, сравнивались для различных переходов с точными результатами, полученными с помощью формул Гордона. При этом наблюдается совпадение с точностью порядка нескольких процентов. Профили спектральных линий, полученные с помощью моделей, предложенных в рамках данного диссертационного исследования, сравниваются с экспериментальными данными и расчетами, проведенными методом молекулярной динамики

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Массив радиационных переходов для атома водорода в скрещенных электрическом и магнитном полях в квазиклассическом приближении растет пропорционально произведению главных квантовых чисел верхнего и нижнего уровней.
2. Для спектральных серий, которые соответствуют переходам между уровнями с разностью главных квантовых чисел, равной 1 (спектральная серия $H_{n\alpha}$) и 2 (спектральная серия $H_{n\beta}$), аналитические формулы для вероятностей радиационных переходов при больших значениях главных квантовых чисел имеют универсальный вид для любых переходов с фиксированной разностью главных квантовых чисел верхнего и нижнего уровней;
3. Использование квазиклассического приближения для вероятностей радиационных переходов при расчете формы спектральных линий нейтрального водорода и

его изотопов, начиная с серии Бальмера, позволяет воспроизвести основные особенности (ширина, положение максимумов) профилей интенсивности для условий диверторной плазмы;

4. Учет зависимости частоты скачков ионного микрополя в рамках стохастической теории Чандрасекара и фон Неймана позволяет воспроизвести ударный предел в рамках процедуры FFM;
5. Формализм матрицы плотности может быть использован для расчетов формы спектральных линий в плазме совместно с процедурой FFM. Это может быть сделано с помощью вычисления эффективного квазистатического ионного штарковского профиля с последующим применением к нему процедуры FFM.

Личный вклад автора

Личный вклад автора диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Получены аналитические формулы для вероятности радиационных переходов в атоме водорода (водородоподобном ионе), находящимся в скрещенных электрическом и магнитном полях, в квазиклассическом приближении для спектральных серий $H_{n\alpha}$ и $H_{n\beta}$. Проведено исследование точности полученных приближений.
2. Предложена модель расчета профилей спектральных линий водорода (водородоподобного иона) в плазме, находящейся в магнитном поле. Используя данную модель, проведены численные расчеты профилей спектральных линий дейтерия для условий, характерных для дивертора токамака.
3. Решена задача об уширении двух симметричных штарковских компонент в рамках процедуры FFM с частотой скачков, зависящей от плазменного микрополя. На примере этой задачи показано, что учет зависимости частоты скачков от величины ионного микрополя позволяет воспроизвести ударный предел в рамках процедуры FFM.
4. Предложен метод вычисления средней частоты скачков ионного микрополя. Получены формулы для расчета средней частоты скачков.

5. Разработан теоретический подход, позволяющий одновременно учитывать эффекты ионной динамики с помощью FFM и интерференцию штарковских уровней в рамках формализма матрицы плотности.

Кроме этого, постановка задач исследований и интерпретация результатов выполнены совместно с научным руководителем. Численные расчеты спектров МЗИ по методу, который предложил автор диссертации, были выполнены Новиковым Андреем Алексеевичем.

Методология и методы научного исследования

Квазиклассические формулы для дипольных матричных элементов получены с помощью асимптотических выражений для дипольных матричных элементов в параболическом представлении и методов теории квантового углового момента. Расчеты формы спектральных линий в замагниченной плазме проведены в рамках классической теории штарковского уширения.

Частота скачков ионного микрополя была рассчитана в рамках теории марковских процессов. Для расчета спектров МЗИ использовался формализм матрицы плотности.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации — 96 страниц, включая 20 рисунков, 3 таблицы, список цитируемой литературы из 114 наименований.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- 1) Курчатовская молодежная школа, Москва (2019).
- 2) Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (2019), Звенигород.
- 3) Конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», МИФИ, Москва (2022).

- 4) Международная конференция «Забабахинские научные чтения», Снежинск (2023).
- 5) 39-я Международная конференция «Физика экстремальных состояний вещества», Кабардино-Балкарская республика, п. Терскол (Эльбрус) (2024, 2025).

Публикации

По теме диссертации было опубликовано 7 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science и рекомендованных ВАК.

Содержание работы

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертации, а также обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость настоящего диссертационного исследования. Кроме этого, здесь же приводятся сведения об апробации работы и краткое содержание диссертации.

В главе 1 получены универсальные квазиклассические формулы для дипольных матричных элементов для электрона, находящегося в кулоновском поле. Выражения получены в специфическом базисе $\{jn'n''\}$, в котором можно быстро диагонализировать гамильтониан атома водорода (водородоподобного иона) в скрещенных электрическом и магнитном полях. В данном базисе в качестве основных интегралов движения используются следующие величины:

$$\mathbf{J}_{1,2} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} \pm \mathbf{A}), \quad (1)$$

где \mathbf{L} — вектор орбитального момента, n' и n'' — проекции векторов $\mathbf{J}_{1,2}$ на оси квантования проекции момента, а \mathbf{A} — вектор Рунге-Ленца, который вычисляется по следующей формуле¹:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\sqrt{-2H_0}} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} - \frac{1}{2}([\mathbf{p}, \mathbf{L}] - [\mathbf{L}, \mathbf{p}]) \right), \quad (2)$$

где H_0 — гамильтониан изолированного атома (иона), а \mathbf{p} — оператор импульса.

Вычисления выполнены для спектральных серий $H_{n\alpha}$ ($\Delta n = 1$) и $H_{n\beta}$ ($\Delta n = 2$). Вывод данных формул основан на использовании квазиклассических асимптотик для дипольных матричных элементов в параболическом базисе и специфических свойствах d-функций Вигнера. Полученные выражения имеют одинаковый вид для любого значения главного квантового числа верхнего уровня. Скорость расчета формы спектральных линий с полученными формулами возрастает пропорционально $n^4\bar{n}^3$, где n и \bar{n} — значения главных квантовых чисел верхнего и нижнего уровней соответственно. В данной главе приводятся конкретные расчеты для переходов $10 \rightarrow 9$

¹Эта формула записана в атомной системе единиц: $m_e = \hbar = e = 1$.

и $10 \rightarrow 8$ для различных конфигураций электрического и магнитного полей. Также представлено сравнение полученных квазиклассических формул с точными значениями вероятностей радиационных переходов. Из этих сравнений оказывается, что, начиная с серии Бальмера, ошибка квазиклассического приближения составляет менее 10%. Числовые данные для переходов серии $H_{n\alpha}$ приведены в таблице 2. В данной таблице во втором столбце приведена средняя ошибка, которая оценивалась по следующей формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|I_i^{sc} - I_i^{acc}|}{I_i^{sc} + I_i^{acc}}, \quad (3)$$

где N — количество компонент, I_i^{sc} — интенсивность, рассчитанная по квазиклассической формуле, а I_i^{acc} — интенсивность, рассчитанная по точным формулам. Скорость расчетов при использовании квазиклассических формул возрастает в $\frac{n^4 \bar{n}^3}{2}$ раз (приведено в третьем столбце таблицы 2). Числовые данные, приведенные в таблице 2 получены для случая перпендикулярных электрического и магнитного полей.

Таблица 2: Средняя ошибка и сокращение массива радиационных переходов для спектральной серии $H_{n\alpha}$

Переход	$\bar{\delta}$	$\frac{n^4 \bar{n}^3}{2}$
$3 \mapsto 2$	0.060	324
$4 \mapsto 3$	0.056	3456
$5 \mapsto 4$	0.033	20000

В главе 2 предложен метод расчета формы спектральных линий для атома водорода (водородоподобного иона), который находится в плазме в магнитном поле. За основу проведенных расчетов взяты результаты, полученные в главе 1. Учтены все значимые механизмы уширения: штарковское уширение ионами, ударное уширение электронами, доплеровское уширение, влияние магнитного поля на форму спектральной линии. Для учета эффектов ИД было использовано FFM. Проведено сравнение с экспериментальными данными, а также с расчетами, проведенными с помощью молекулярной динамики. Показано, что уже для серии Бальмера разработанный подход позволяет воспроизвести основные характеристики профиля спектральной линии — ширину линии и положение пиков интенсивности.

На Рисунке 1 представлено сравнение контура линии, полученного в рамках представленной модели и экспериментальных данных. Рассматривается переход $3 \mapsto 2$

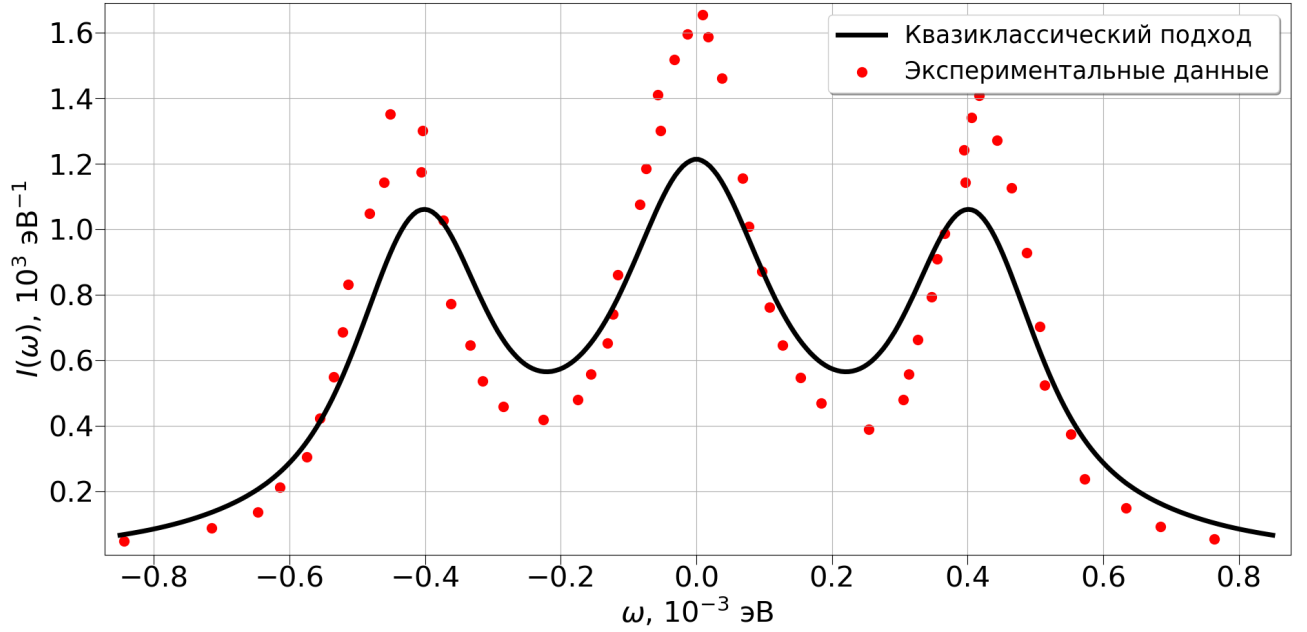


Рис. 1: Сравнение расчетов по представленной модели с экспериментальными данными из [45] для спектральной линии D_α (переход $3 \mapsto 2$); $N_e = N_i = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T = 1 \text{ эВ}$, $B = 7 \text{ Тл}$, направление наблюдения перпендикулярно магнитному полю; центр профиля смещен в начало координат

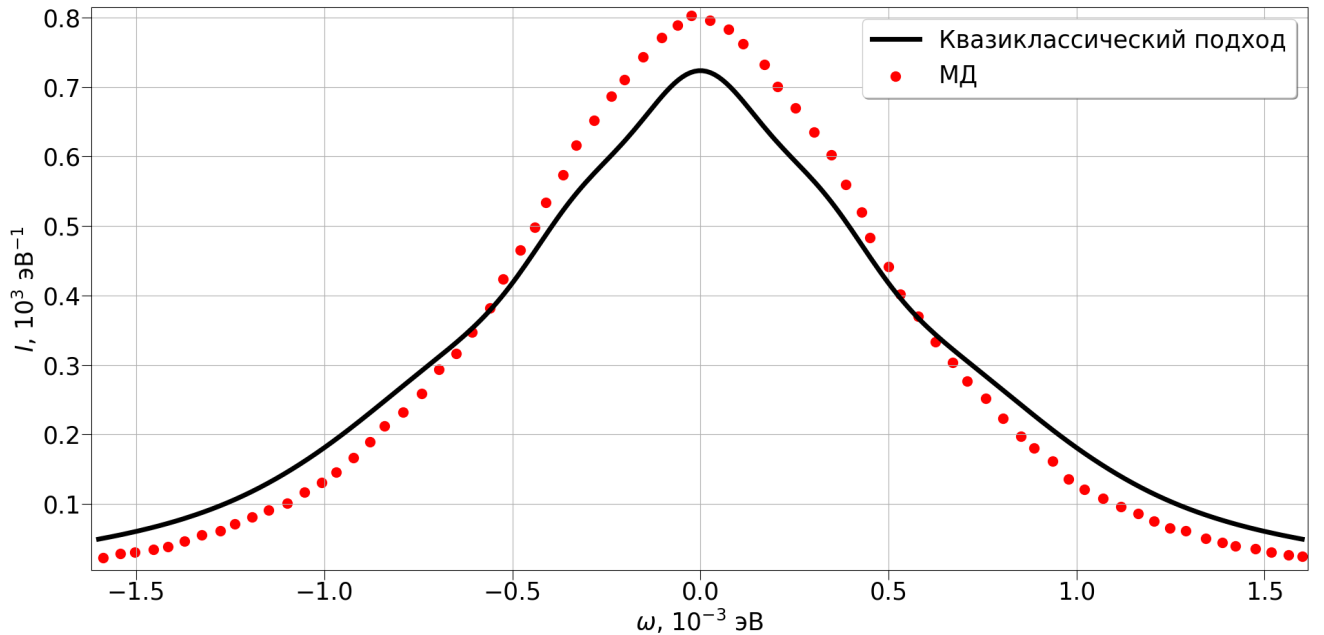


Рис. 2: Сравнение расчетов по представленной модели с данными, полученными с помощью МД [46], для спектральной линии D_β (переход $4 \mapsto 2$); $N_e = N_i = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T = 1 \text{ эВ}$, $B = 5 \text{ Тл}$, направление наблюдения перпендикулярно магнитному полю; центр профиля смещен в начало координат

в дейтериевой плазме (линия D_α). Температура плазмы составляет $T = 1$ эВ. Плотность электронов при этом равна 10^{15} см $^{-3}$ (практически полная ионизация). Магнитное поле составляет $B = 7$ Тл. Наблюдение велось в направлении, перпендикулярном магнитному полю. Экспериментальные данные получены на токамаке Alcator C-Mod [45]. Ширина инструментального профиля пренебрежимо мала. Несмотря на то, что приближение для расчета вероятностей радиационного перехода формально работает для случая $\Delta n \ll n$, в расчете удается воспроизвести основные характеристики спектральной линии — ширина на полувысоте (1.04 эВ в расчете и 1.02 эВ в эксперименте) и положение боковых пиков (± 0.40 эВ в расчете и ± 0.43 эВ в эксперименте). Кроме этого, отношение высоты центрального и бокового пика отличается только на 7% (1.14 в расчете и 1.22 в эксперименте). Основное отличие заключается в том, что линии триплета получились в расчете немного шире, чем в эксперименте. Однако, на них могут влиять модели для расчета электронной ширины и учета эффектов ионной динамики.

На Рисунке 2 представлено сравнение контура линии, рассчитанного в рамках представленной модели, и данных, полученных с помощью метода молекулярной динамики, из работы [46]. Рассматривается переход $4 \mapsto 2$ в дейтериевой плазме (линия D_β). Температура плазмы составляет $T = 1$ эВ. Плотность электронов при этом равна 10^{15} см $^{-3}$. Магнитное поле составляет $B = 5$ Тл. Наблюдение велось в направлении, перпендикулярном магнитному полю. В данном случае наблюдается хорошее соответствие между двумя расчетами. Отличие в ширине линии составляет 5%.

В главе 3 на примере модельной задачи о двух симметричных штарковских компонентах показано, что, если учесть зависимость частоты скачков в FFM от сдвига энергии в соответствии со стохастической теорией Чандрасекара и фон Неймана, то с помощью FFM удастся воспроизвести ударный предел, чего не удавалось в рамках стандартной формулировки FFM. Предложен метод вычисления средней частоты скачков ионного микрополя для полной спектральной линии (набора штарковских, относящихся к определенным значениям главных квантовых чисел n). Исследовано влияние неидеальности плазмы на частоту скачков ионного микрополя. Проведены расчеты формы спектральных линий атома водорода с учетом зависимости частоты скачков от величины ионного микрополя. Представлено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Показано, что учет зависимости частоты

скачков от величины плазменного микрополя позволяет лучше воспроизвести форму провала для профиля линии H_{β} ($n = 4 \rightarrow \bar{n} = 2$).

В главе 4 предложен способ одновременного учета эффектов ионной динамики с помощью процедуры FFM и интерференции штарковских уровней. Для этого была использована классическая теория уширения. Суть данного метода заключается в следующем: сначала в рамках формализма матрицы плотности рассчитывается профиль интенсивности спектральной линии с учетом вклада ионов в квазистатистическом приближении. Затем рассчитывается профиль Фойгта (который отвечает за электронное и доплеровские механизмы уширения) для этой линии. Потом с помощью операции дековолюции вычисляется эффективный ионный профиль. К ним применяется процедура FFM. В итоге полученный результат необходимо свернуть с профилем Фойгта.

В рамках описанного подхода проведены расчеты линии He_{β} для гелиеподобного иона Ag в плотной плазме. Полученные результаты сравниваются с расчетами, проведенными с помощью МД. Представлена расчетная интерпретация экспериментальных измерений спектров гелиеподобного иона Ti в плотной лазерной плазме. На данном примере продемонстрировано, что учет эффектов ионной динамики может существенно увеличить точность диагностики лазерной плазмы по спектрам многозарядных ионов.

Основные результаты

В рамках настоящего диссертационного исследования предложены решения для ряда задач теории уширения спектральных линий в плазме. Теоретические результаты, представленные в настоящей работе, могут быть полезны для различных задач плазменной диагностики. Разработаны модели для широкого диапазона плазменных параметров. Например, во второй главе данной диссертации рассматривается излучение нейтрального водорода в плазме с температурой порядка 1 эВ и плотностью электронов 10^{13} – 10^{16} см $^{-3}$. Данные параметры характерны для плазмы в диверторе токамака. В четвертой главе настоящей работы представлены результаты расчетов спектров МЗИ в плотной лазерной плазме с температурой около 1 кэВ и плотностью порядка 10^{24} см $^{-3}$.

Ниже представлен список основных научных результатов, полученных в рамках настоящей работы.

1. Для спектральных серий водорода $H_{n\alpha}$ ($\Delta n = 1$) и $H_{n\beta}$ ($\Delta n = 2$) получены квазиклассические формулы для координатных матричных элементов (для вероятностей радиационного перехода). Вычисления были проведены в специальном базисе $\{jn'n''\}$, который тесно связан с параболическим квантованием. Полученные квазиклассические асимптотики имеют очень простой и одинаковый (универсальный) вид для всех значений главных квантовых чисел. Данные формулы позволяют радикально упростить расчеты спектров ридберговских атомов водорода в скрещенных электрическом и магнитном полях. Проведено сравнение полученных результатов с точными формулами Гордона. Показано, что полученные результаты обладают высокой точностью даже для первых бальмеровских линий.
2. Используя полученные квазиклассические формулы, проведены расчеты формы спектральных линий водорода и его изотопов в условиях диверторной плазмы.

Полученные результаты находятся в соответствии с экспериментальными данными, а также расчетами, выполненными с помощью МД.

3. Классическая процедура FFM обобщена на случай частоты скачков, зависящей от плазменного микрополя. С помощью полученного результата показано, что если частота скачков будет зависеть от величины микрополя согласно стохастической теории Чандрасекара и фон Неймана, то с помощью процедуры FFM можно будет воспроизвести ударный предел.
4. Получены формулы для средней частоты скачков, учитывающие зависимость частоты скачков от величины плазменного микрополя и неидеальность плазмы.
5. Предложен подход, позволяющий использовать формализм матрицы плотности совместно с процедурой FFM. Используя данный подход, проведены конкретные расчеты спектров МЗИ.

Основные публикации по теме диссертации

По теме диссертации было опубликовано 7 работ в рецензируемых научных изданиях:

- 1) Летунов А. Ю., Лисица В.С. Спектры Штарка - Зеемана и Блохинцева в ридберговских атомах // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2020. Т. 158, № 5. с. 800–811.
- 2) Letunov A.Yu., Lisitsa V.S. Spectra of a Rydberg Atom in Crossed Electric and Magnetic Fields // Universe. 2020. Vol. 6, p. 1–9
- 3) Letunov A.Yu., Lisitsa V.S. The Coulomb Symmetry and a Universal Representation of Rydberg Spectral Line Shapes in Magnetized Plasmas // Symmetry. 2020. Vol. 12, p. 1–14
- 4) Astapenko V.A., Letunov A.Yu., Lisitsa V.S. From the Vector to Scalar Perturbations Addition in the Stark Broadening Theory of Spectral Lines // Universe. 2020. Vol. 7, p. 1–13
- 5) Letunov A.Yu., Lisitsa V.S. Review of Rydberg Spectral Line Formation in Plasmas // Atoms. 2023. Vol. 11, p. 1–19
- 6) Letunov A.Yu., Lisitsa V.S., Loboda P.A., Novikov A.A. On Considering the Effects of Ion Dynamics In Modeling the Spectra of Multicharged Ions // Physics of Atomic Nuclei. 2023. Vol. 86, №10, p. 2224–2230
- 7) Летунов А.Ю., Лисица В.С., Лобода П.А., Новиков А.А. Учет нестатичности ионного микрополя на основе теории марковских процессов при описании штарковского уширения спектральных линий в плазме. // Письма Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2024. Т.120, № 2, с. 118-124.

Список литературы

- [1] Furlanetto S. R., Oh S. P., Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe // *Physics reports*. 2006. Vol. 433, no. 4. p. 181.
- [2] Fluorescent excitation of Balmer lines in gaseous nebulae: case D / V. Luridiana, S. Simon-Diaz, M. Cervino et al. // *The Astrophysical Journal*. 2009. Vol. 691, no. 2. p. 1712.
- [3] Dreizler S., Werner K. Spectral analysis of hot helium-rich white dwarfs. // *Astronomy and Astrophysics*. 1996. Vol. 314. p. 217.
- [4] Tennyson J. *Astronomical Spectroscopy: An Introduction to the Atomic and Molecular Physics of Astronomical Spectroscopy*. World Scientific, 2019.
- [5] Emerson D. *Interpreting astronomical spectra*. John Wiley & Sons, 1998.
- [6] Мурзин В.С. *Астрофизика космических лучей*. Litres, 2017.
- [7] Ginzburg V. L., Syrovatskii S. I. *The origin of cosmic rays*. Elsevier, 2013.
- [8] Totsuka Y. Neutrino astronomy // *Reports on Progress in Physics*. 1992. Vol. 55, no. 3. p. 377.
- [9] Halzen F., Klein S. R. Invited review article: IceCube: an instrument for neutrino astronomy // *Review of Scientific Instruments*. 2010. Vol. 81, no. 8.
- [10] Haxton W. C., Hamish R.G., Serenelli A. M. Solar neutrinos: status and prospects // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2013. Vol. 51. p. 21.
- [11] Грим Г. *Уширение спектральных линий в плазме (перевод с английского)*. М.:МИР, 1978.

-
- [12] Oks E. *Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas Using Spectral Lineshapes of One-, Two-, and Three-Electron Systems*. World Scientific, 2017.
- [13] Oks E. *Advances in X-Ray Spectroscopy of Laser Plasmas*. IOP Publishing, 2020.
- [14] Собельман И.И. *Введение в теорию атомных спектров*. М.:Государственное издательство физико-математической литературы, 1963.
- [15] Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. *Возбуждение атомов и уширение спектральных линий*. М.:Наука, 1979.
- [16] Раутиан С. Г., Собельман И.И. Влияние столкновений на доплеровское уширение спектральных линий // *Успехи физических наук*. 1966. Т. 90. с. 209.
- [17] The Rydberg series of helium-like Cl, Ar and S and their high-n satellites in tokamak plasmas / J.E. Rice, K.B. Fournier, U.I. Safronova et al. // *New Journal of Physics*. 1999. Vol. 1, no. 1. p. 19.
- [18] Doppler line shape model for the WI 5d56s—5d56p transition at 400.9 nm in tokamaks / A. Sepetys, R. Guirlet, J. Rosato et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2019. Vol. 61, no. 12. p. 125017.
- [19] Argon doped pellets for fast and efficient radiative power removal in ASDEX Upgrade / A Kallenbach, PT Lang, M Bernert et al. // *Nuclear Fusion*. 2022. Vol. 62, no. 10. p. 106013.
- [20] Laser-induced fluorescence for ITER divertor plasma / A.V. Gorbunov, E.E. Mukhin, E.B. Berik et al. // *Fusion Engineering and Design*. 2017. Vol. 123. p. 695.
- [21] Solid-Density Ion Temperature from Redshifted and Double-Peaked Stark Line Shapes / B. F. Kraus, L Gao, K.W. Hill et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2021. Vol. 127. p. 205001.
- [22] Hot spot evolution measured by high-resolution x-ray spectroscopy at the national ignition facility / L. Gao, B.F. Kraus, K. W. Hill et al. // *Physical Review Letters*. 2022. Vol. 128, no. 18. p. 185002.

-
- [23] Study of Stark broadening of krypton helium- β lines and estimation of electron density and temperature in NIF compressed capsules / K. W. Hill, L. Gao, B.F. Kraus et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2022. Vol. 64. p. 105025.
- [24] Smirnov G.T., Sorochenko R.L., Pankonin V. Stark broadening in radio recombination lines towards the Orion Nebula // Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), vol. 135, no. 1, June 1984, p. 116-121. 1984. Vol. 135. p. 116.
- [25] Pedlar A., Davies R.D. Observations of recombination lines at decimetre wavelengths // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1972. Vol. 159. p. 129.
- [26] Lebedev V. S., Beigman I. L. Physics of highly excited atoms and ions. Springer Science & Business Media, 2012.
- [27] Gordon M.A., Sorochenko R.L. Radio Recombination Lines: 25 Years of Investigation [electronic resource]: Proceedings of the 125th Colloquium of the International Astronomical Union, Held in Puschino, USSR, September 11–16, 1989.
- [28] Bell M.B. More on the narrowing of impact broadened radio recombination lines at high principal quantum number // Astrophysics and Space Science. 2012. Vol. 340. p. 127.
- [29] Gigosos M.A. Stark broadening models for plasma diagnostics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. p. 343001 (33p).
- [30] Коган В.И. Уширение спектральных линий в высокотемпературной плазме // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза (под редакцией М.А. Леонтовича). 1958. Т. 4. с. 258.
- [31] Ion-dynamics effect on hydrogenic Stark profiles in hot and dense plasmas / R. Stamm, Y. Botzanowski, V.P. Kaftandjian et al. // Physical review letters. 1984. Vol. 52, no. 25. p. 2217.
- [32] Gigosos M. A., Cardenoso V. New plasma diagnosis tables of hydrogen Stark broadening including ion dynamics // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 1996. Vol. 29, no. 20. p. 4795.

-
- [33] Effects of ion dynamics and opacity on Stark-broadened argon line profiles / D.A. Haynes Jr, D.T. Garber, C.F. Hooper Jr et al. // *Physical Review E*. 1996. Vol. 53, no. 1. p. 1042.
- [34] Frequency-fluctuation model for line-shape calculations in plasma spectroscopy / B. Talin, A. Calisti, L. Godbert et al. // *Physical Review A*. 1995. Vol. 51, no. 3. p. 1918.
- [35] Раутиан С.Г., Смирнов Г.И., Шалагин А.М. Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул. Новосибирск: Наука, 1979.
- [36] Model microfield method for partial redistribution of resonance radiation in dense plasmas / A.V. Demura, N. Feautrier, I.N. Kosarev et al. // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 1998. Vol. 31, no. 19. p. 4283.
- [37] Line shape modeling of multielectron ions in plasmas / P.A. Loboda, I.A. Litvinenko, G.V. Baydin et al. // *Laser and Particle Beams*. 2000. Vol. 18. P. 275–289.
- [38] New advances in redistribution of resonance radiation in dense plasmas / A.V. Demura, N. Feautrier, I.N. Kosarev et al. // *AIP Conference Proceedings / American Institute of Physics*. Vol. 467. 1999. p. 127.
- [39] Гаспарян П.Д., Герасимов В.М. Исследование влияния теплового движения возмущающих частиц на штарковские профили спектральных линий многозарядных ионов в плотной плазме методом модельного микрополя // *ВАНТ (серия Теоретическая и прикладная физика)*. 1996. с. 56.
- [40] Диагностика лазерного индуцированного тушения для диверторной плазмы Т-15МД / Д. Д. Криворучко, А. В. Горбунов, А.А. Пшенов [и др.] // *Физика Плазмы*. 2023. Т. 49, № 6. с. 545.
- [41] Laser-induced fluorescence of helium ions in ITER divertor / A.V. Gorbunov, E.E. Mukhin, E.B. Berik et al. // *Fusion Engineering and Design*. 2019. Vol. 146. p. 2703.
- [42] Ion dynamics effect on Stark-broadened line shapes: A cross-comparison of various models / S. Ferri, A. Calisti, C. Mossé et al. // *Atoms*. 2014. Vol. 2, no. 3. p. 299.

- [43] Kelleher D.E., Wiese W.L. Observation of ion motion in hydrogen Stark profiles // Physical Review Letters. 1973. Vol. 31, no. 24. p. 1431.
- [44] Wiese W.L., Kelleher D.E., Paquette D.R. Detailed study of the Stark broadening of Balmer lines in a high-density plasma // Physical Review A. 1972. Vol. 6, no. 3. p. 1132.
- [45] Application of Magnetically-Broadened Hydrogenic Line Profiles to Computational Modeling of a Plasma Experiment / M.L. Adams, H.A. Scott, R.W. Lee et al. // J. Quantum Spectrosc. Radiat. Transfer. 2001. Vol. 71. p. 117.
- [46] Rosato J., Marandet Y., Stamm R. A new table of Balmer line shapes for the diagnostic of magnetic fusion plasmas // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. Vol. 187. p. 333.