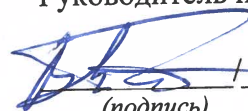




НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия
Направленность (профиль) подготовки: 01.04.08 физика плазмы
Форма обучения: очная

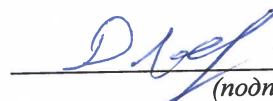
Допущен к ГИА
Руководитель научно-тематического семинара


(подпись) / Пастухов В. П.
(расшифровка подписи)
«20» мая 2020 г.

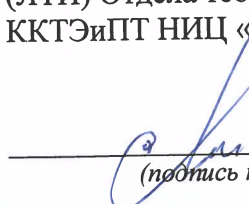
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

Статистические модели радиационно-столкновительных процессов в
термоядерной плазме

Аспирант: Леонтьев Дмитрий Сергеевич


(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Лисица Валерий
Степанович
профессор,
доктор физико-математических наук,
начальник Лаборатории теории излучения
(ЛТИ) Отдела теории плазмы (ОТП)
ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт»


(подпись научного руководителя)

Москва, 2020

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Актуальность расчетов радиационно-столкновительных процессов с тяжелыми многоэлектронными ионами обусловлена использованием тяжелых элементов, в первую очередь вольфрама, в современных термоядерных установках, включая конструкцию будущего термоядерного реактора ИТЭР. При взаимодействии плазмы с пластинами дивертора, сделанных из вольфрама, происходит накопление тяжелых примесей в разряде. Присутствие в плазменном шнуре тяжелых примесей существенно влияет на энергобаланс плазмы вследствие высокой излучательной способности, поскольку даже при больших электронных температурах ионы этих примесей будут содержать большое число связанных электронов. Кроме того, данный эффект имеет тенденцию усиливаться в результате наблюдаемой в экспериментах аккумуляции тяжелых примесей. Помимо этого, накопление вольфрама в центре плазменного шнура в H-режиме может приводить к потере устойчивости из-за развития МГД процессов, срыву разряда, переходу в L-моду. Поэтому важно проводить постоянный мониторинг плазмы, в частности следить за содержанием примесей тяжелых ионов в плазме. Для составления ионизационного баланса необходимо рассчитывать скорости радиационно-столкновительных процессов, что является весьма нетривиальной задачей в случае многоэлектронных ионов.

С точки зрения атомной физики вольфрам выделяется среди всех других примесей в плазме, чрезвычайной сложностью атомной структуры и диапазоном возможных изменений заряда ионов (75 возможных зарядовых состояний). При этом диапазон изменения плазменных параметров (особенно температуры) оказывается чрезвычайно широким: от 1 эВ в пристеночной плазме до 20-30 кэВ в центре плазменного шнура. Это обстоятельство требует развитие теоретических моделей расчета атомных процессов в широком диапазоне энергий. В настоящей

работе в качестве такой модели расчета основного канала рекомбинации тяжелых ионов – диэлектронной рекомбинации — предлагается использовать статистические модели многоэлектронных ионов.

Радиационные потери плазмы на примесях, вызванные возбуждением ионов примеси электронами, приводят к остыванию плазмы, и, следовательно, представляют серьезную проблему. Однако, помимо радиационных потерь электронов на излучение из-за столкновения с тяжелыми ионами, в плазме могут существовать и другие каналы потерь. Одним из каналов является канал радиационных потерь альфа-частиц. В данной работе предполагается оценить радиационные потери плазмы, вызванные возбуждением ионов примеси альфа-частицами, и сравнить их с аналогичными потерями электронов. Выбор опять же вольфрама связан с тем, что даже при температурах, близких к протеканию термоядерной реакции, в нем остается значительное число связанных электронов. Аналогичные квантовомеханические расчеты из-за этого крайне трудоемки, и поэтому необходимо развитие методов, позволяющих их облегчить. За счет того, что в ионе сохраняется большое число электронов, применимо статистическое приближение.

У тяжелых элементов неоднократно наблюдались массивы линий, соответствующих радиационным переходам от всех представленных в зарядовом распределении ионов, образующие квазинепрерывный спектр излучения, называемый «квазиконтинуум». В частности, для исследования транспорта вольфрама в современных термоядерных установках нужно исследовать возбуждение и интенсивность высвечивания как отдельных линий, так и массивов линий. Поэтому стоит задача по описанию распределения радиационных потерь энергии по частотам или длинам волн радиационных переходов в ионах примеси. Из-за того, что зачастую такие переходы часто происходят в пределах одной электронной оболочки и имеет сложную структуру от множества переходов между близкими атомными состояниями, квазинепрерывный спектр сосредоточен

в узком диапазоне длин волн 2-8 нм и имеет характерный профиль, обрывающийся в области малых длин волн. Расчет большого числа переходов представляет собой весьма трудоемкую задачу, поэтому разумно использовать статистическую модель и рассматривать возбуждение переходов как коллективные возбуждения атомной оболочки с частотами и интенсивностями, задаваемые статистически через распределение плотности электронов в атоме, что позволяет облегчить расчеты.

Цели и задачи исследования

Целью представленной работы является теоретическое исследование радиационно-столкновительных процессов с участием тяжелых ионов в рамках статистической модели атома.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка моделей расчета скорости диэлектронной рекомбинации на базе статистической теории атома.
- Создание численного кода и проведение численных расчетов скоростей диэлектронной рекомбинации для ряда многоэлектронных ионов различных химических элементов и их тестирование путем сравнения с данными более детальных квантовомеханических кодов
- Исследование нового канала радиационных потерь – радиационные потери быстрых альфа-частиц на тяжелых примесях и сравнение их с радиационными потерями электронов в термоядерной плазме.
- Исследование спектральных радиационных потерь (квазиконтинуума) тяжелых элементов (в частности, вольфрама) в условиях плазмы, наблюдаемой в современных термоядерных установках.

- Вычисление вероятности поуровневых переходов внутри многоэлектронного тяжелого иона.

Методы исследования

Радиационно-столкновительные процессы в плазме с участием тяжелых ионов рассматриваются в различных статистических моделях с использованием непрерывных распределений электронов внутри иона, в частности распределения Томаса-Ферми. Для расчетов характеристик процессов используются авторские коды. Все численные расчеты выполнены на языке программирования Python 2.7 с использованием дополнительных библиотек NumPy и SciPy.

Научная новизна результатов проведенных исследований

- Впервые статистическая модель была применена для расчета скорости диэлектронной рекомбинации тяжелых ионов.
- Рассмотрен новый канал радиационных потерь быстрых частиц: альфа-частиц и дейтронов. Потери были рассчитаны в рамках статистической модели.
- Были рассчитаны в статистической модели величины критических концентраций вольфрама в плазме.
- Впервые был смоделирован квазинконтинуум тяжелых ионов в термоядерной плазме в рамках статистической модели, получены огибающие величин вероятностей радиационных переходов в ионах.

Практическая значимость результатов проведенных исследований

- Были рассчитаны скорости диэлектронной рекомбинации тяжелых ионов в статистической модели. Расчет занимает меньшее время по сравнению с поуровневыми кодами, а результаты сравнимы с ними. Это позволяет

использовать результаты статистической теории для мониторинга параметров плазмы, например распределения по зарядовым состояниям.

- Был произведен расчет радиационных потерь быстрых альфа-частиц на тяжелых ионах, и получены величины критических концентраций вольфрама в плазме.
- Проведенное моделирование квазиконтинуума тяжелых ионов в дальнейшем можно использовать для диагностики и мониторинга содержания тяжелых примесей в плазменном шнуре.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов данного исследования обеспечивается использованием современных методов расчета и сравнением с данными экспериментов и других численных кодов, использующих поуровневые квантовомеханические модели.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- Показана возможность расчета скорости диэлектронной рекомбинации тяжелых ионов в статистическом подходе.
- Произведен расчет радиационных потерь альфа-частиц и дейтронов на тяжелых ионах, уточнены критические концентрации вольфрама в плазме.
- Показана возможность моделирования квазиконтинуума тяжелых ионов при помощи статистической модели атома, обоснована характерная форма спектров тяжелых ионов.

Личный вклад автора

Лично автор проводил все расчеты при помощи самостоятельно написанных кодов, использующих статистическую модель. Также он обрабатывал

и интерпретировал результаты, которые легли в основу представленной работы. Постановка задач проводилась автором совместно с научным руководителем и научной группой (Лисицей В. С., Демурой А.В. и Шурыгиным В.А.)

Апробация работы

Основные результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на тематическом семинаре “Теория магнитного удержания плазмы” в НИЦ «Курчатовский институт», а также на 12 международных и всероссийских научных конференциях и молодежных школах, таких как XLIII, XLIV, XLV, XLVI, XLVII Международные Звенигородские конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), XXV Съезд по спектроскопии, (Троицк, 2016), XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная школа (Москва, 2016), 5-я международная школа FAIR (Кастильоне дель Пискайя, Италия, 2017), X и XI конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2016, 2018), 44-я и 46-я Международные конференции Европейского физического общества по физике плазмы (Белфаст, Великобритания, 2017; Милан, Италия, 2019).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные научные результаты, содержащиеся в диссертации, отражены в 18 публикациях, в том числе в 6 рецензируемых научных журналах и 12 материалах конференций, в качестве объекта интеллектуальной собственности зарегистрирована программа для ЭВМ.

Содержание работы

В введении описана исследуемая в работе проблема, сформулированы основные задачи и описаны методы их решения, обосновывается актуальность темы исследования. В введении кратко описывается важность исследования

радиационно-столкновительных процессов с участием вольфрама в современных термоядерных установках.

Первая глава посвящена обзору работ по статистической модели и исследованиям радиационно-столкновительных процессов в плазме с участием тяжелых ионов, таких как диэлектронная рекомбинация, возбуждение электронами и быстрыми тяжелыми частицами. Кроме того, был проведен обзор работ по изучению спектров тяжелых ионов, в частности вольфрама, полученных на различных термоядерных установках. Были рассмотрены статистические модели и опыт их применения для изучения процессов, протекающих в плазме. Эти модели применялась для расчета коллективных возбуждений оболочек, скорости ионизации и поляризуемости тяжелых атомов и ионов. В работах указывается, что статистические модели позволяют достаточно хорошо описывать данные процессы. Анализ работ по исследованию диэлектронной рекомбинации различных элементов показал, что существующие на данный момент численные коды дают большой разброс данных для одного и того же зарядового состояния при данной температуре, что может свидетельствовать о возможном несовершенстве методов исследования данного процесса. Был проведен обзор работ, посвященных расчету радиационных потерь в плазме. До этого рассматривался только один канал радиационных потерь – потери на радиационное излучение электронов в плазме, однако следует учесть также и столкновения с тяжелыми частицами. Для исследования данных процессов использовалась не только статистическая модель, но и Кулон-Борновское приближение. Учет этого нового канала может скорректировать определение критической концентрации примесей тяжелых ионов, в частности, вольфрама в плазме, при которой термоядерная реакция перестает быть самоподдерживающейся. При анализе работ по исследованию квазиконтинуума тяжелых ионов, полученных на термоядерных установках, были установлены общие свойства и характеристики этого участка спектра, например наличие резкого обрыва со стороны коротких длин волн.

Во второй главе проводится расчет скорости диэлектронной рекомбинации в статистической модели для ионов вольфрама. Сначала описывается используемая здесь и в дальнейшем статистическая модель, основанная на модели атома Томаса-Ферми, указываются используемые электронные распределения в ионе. Основной идеей статистической модели является коллективный характер возбуждения электронов ионного остова. В работе использованы две модели для определения частоты: 1) модель локальной плазменной частоты (ЛПЧ), согласно которой возбуждаемые частоты соответствуют плазменным частотам внутри иона, которые зависят от локальной плотности электронов [1]: $\omega_p(r) = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n(r)}{m_e}}$; 2) Приближение Крамерсовской электродинамики [2,3], согласно которой возбуждаемые частоты определяются изменением углового скорости вращения вблизи точки поворота классической траектории движения электрона (модель Роста): $\omega_R = \frac{\hbar(L+1/2)}{mr^2}$. Используется связь между распределением сил осцилляторов и электронной плотностью внутри иона согласно правилу Райхе-Куна [4,5]: $f_{if} = 4\pi n(r) r^2 dr$. Таким образом, характеристики радиационно-столкновительных процессов можно выразить через распределения электронной плотности, и, следовательно, они являются функционалами локального электронного распределения внутри иона.

Далее описывается процесс диэлектронной рекомбинации, указываются используемые в работе приближения. На основе общих представлениях об определении процесса диэлектронной рекомбинации, его скоростной коэффициент был выражен в виде суммы коэффициентов ветвления, связанных с конкурирующими каналами радиационного и автоионизационного распадов дважды возбужденных состояний атомов или ионов. Скорости этих каналов были выражены в терминах статистической модели и были получены формулы для скорости диэлектронной рекомбинации в статистической модели. Для упрощения расчетов был показан процесс усреднения по орбитальному моменту захваченного электрона скорости автоионизационного распада. После этого были рассмотрены три частных случая статистической модели с различными электронными

распределениями и зависимостями частоты от радиуса: модель Томаса-Ферми с частотой перехода, определяемой локальной плазменной частотой; модель Томаса-Ферми, селективную по орбитальному моменту ионного остова с частотами, также зависящими от орбитального момента остова; модель Томаса-Ферми, селективную по орбитальному моменту ионного остова с частотой, определяемой изменением угловой скорости вблизи точки поворота траектории электрона (частота Роста).

На рисунке 1 представлены результаты расчетов скорости диэлектронной рекомбинации в зависимости от электронной температуры плазмы., а также сравнение с данными численных расчетов. Анализ результатов показал, что статистические модели дают оценку сверху для скоростных коэффициентов диэлектронной рекомбинации, а их результаты близки к данным точных квантовомеханических расчетов. При этом из рассмотренных моделей наиболее оптимальные результаты показала статистическая модель Роста.

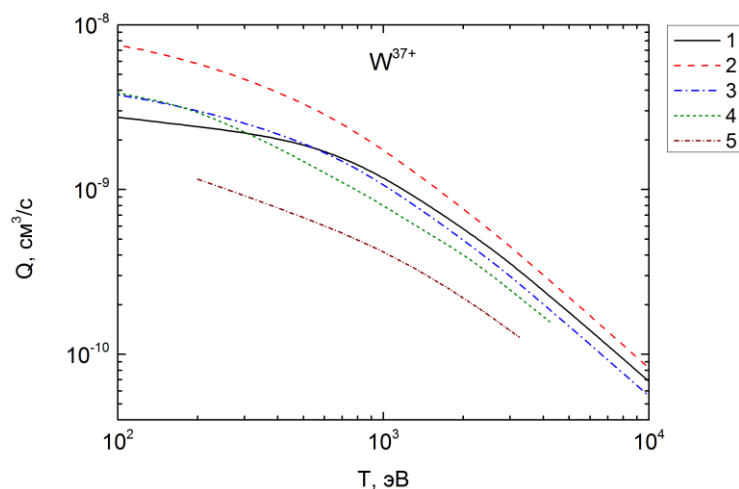


Рис.1 Сопоставление статистических зависимостей скорости ДР иона W^{37+} от температуры с расчетами поуровневыми кодами: (1) - модель Томаса-Ферми и модель ЛПЧ; (2) - модель Томаса-Ферми с электронными оболочками ионного остова с орбитальным моментом L и Брандта-Лундквиста с парциальной по L электронной плотностью; (3) - модель Томаса-Ферми с парциальной по L плотностью электронов и частота Роста, (4) – данные кода FAS из [6], (5) – данные кода ADPAK [7].

В третьей главе был рассмотрен новый канал радиационных потерь энергии альфа-частиц в плазме с тяжелыми примесями. Этот канал при больших температурах сравним с электронными радиационными потерями и составляет до 20%-50% от них, что совпадает с первоначальными грубыми оценками. Был произведен расчет радиационных потерь альфа-частиц и электронов в двух статистических моделях: модели локальной плазменной частоты и в модели Роста; также было использовано Борн-Кулоновское приближение. Сравнение результатов расчета радиационных потерь электронов в данных моделях между собой и с данными квантомеханического кода показало, что все подходы дают близкие результаты, в том числе и к поуровневым расчетам, что говорит о разумности и эффективности статистических моделей в применении к расчету радиационных потерь и для тяжелых заряженных частиц.

На рисунке 2 показан график зависимости от температуры отношения полных на один примесный ион радиационных потерь R альфа-частиц и электронов (с учетом тормозного, рекомбинационного излучения и излучения при диэлектронной рекомбинации).

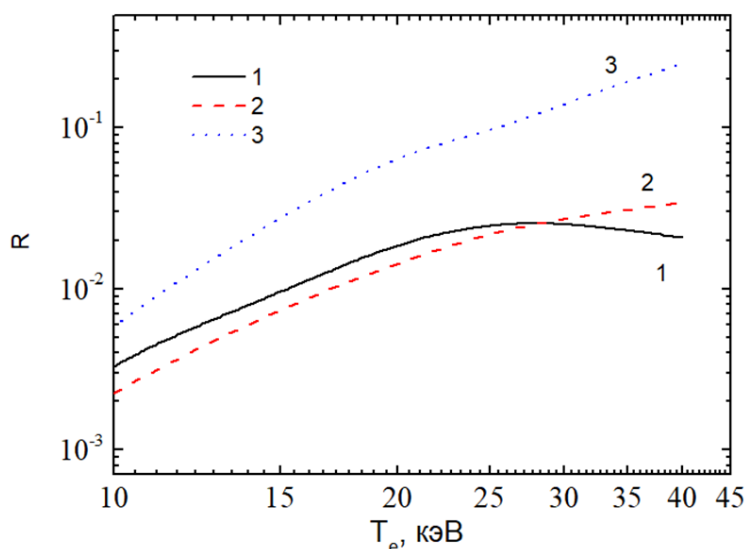


Рис. 2 Зависимость от температуры плазмы T_e отношения полных на один примесный ион радиационных потерь R альфа-частиц и электронов (с учетом тормозного, рекомбинационного излучения и излучения при диэлектронной рекомбинации) [8]: 1 – модель Роста; 2 – модель ЛПЧ; 3 – Кулон-Борновское приближение.

Как видно из рисунка, отношения потерь в основном возрастают, при этом статистические модели дают близкие друг к другу результаты. Результаты расчетов по Кулон-Борновскому приближению превышают данные статистических моделей на порядок, что можно объяснить подстановкой максимального значения функции сечения возбуждения.

Далее канал возбуждения альфа-частицами связанных электронов был использован для определения критических концентраций содержания вольфрама в плазме. Как показали результаты расчетов, величина критической концентрации, полученной из уравнения энергетического баланса выше, чем критическая концентрация, определенная из приравнивания доли излученной энергии на возбуждение свободных и связанных электронов. При этом, эта величина составляет порядка 10^{-3} , что сравнима с прежними оценками для вольфрама [9] при коэффициенте возврата $X=0.2$, и которые равны примерно 0.002.

В четвертой главе проводилось моделирование квазиконтинуума тяжелых ионов, таких как вольфрам, гадолиний, свинец, золото в рамках статистической модели. Для описания распределения плотности электронов в ионе использовалось приближение Слэтера, позволяющее выделить конкретные электронные оболочки с заданными главным и орбитальным квантовыми числами. Кроме того, его использование позволяло воспроизвести характерную особенность таких спектров, а именно наличие обрыва в области коротких длин волн. Параметры распределения подбирались таким образом, чтобы максимально точно воспроизводить положение основных пиков отдельно выделенных ионов в наблюдаемом спектре. Спектральное распределение радиационных потерь отдельного иона сворачивалось с аппаратной функцией, имеющей гауссовый вид, для того чтобы провести надлежащее сравнение с экспериментальными и расчетными данными. Кроме того, они усреднялись по функции распределения по зарядовым состояниям, также имеющим гауссовый вид. Для расчёта распределений по зарядовым состояниям примесей тяжелых элементов в рамках статистической теории были

рассчитаны отношения скорости ионизации [10–14] к скорости диэлектронной рекомбинации [15], и по этим данным построено распределение по зарядовым состояниям при заданной температуре. Кроме того, в качестве сравнения для расчета равновесия по зарядовым состояниям ионов вольфрама использовались данные работы [7], где средний заряд ионов оказывается больше, чем в статистической модели. Значения среднего заряда ионов в статистической модели при электронных температурах 800, 1500, 3000, 5000 эВ следующие: 23, 28, 33 и 43, соответственно. В то время как согласно работам [7,8] средние значения заряда ионов: 24, 30, 43 и 47. При получении этих данных в используемые скоростные коэффициенты вводились произвольные множители для подгонки под результаты сложных экспериментов на больших установках [7,8], что и могло послужить возникшим расхождениям. В рамках статистической теории были получены усредненные огибающие спектров для вышеперечисленных элементов при различных температурах. Сравнение результатов численных расчетов в статистической модели с данными квантовых поуровневых расчетов и с экспериментальными данными на термоядерных установках продемонстрировало удовлетворительное согласие. На рисунке 3 продемонстрировано сравнение теоретического расчета квазиконтинуума вольфрама с экспериментальными данными.

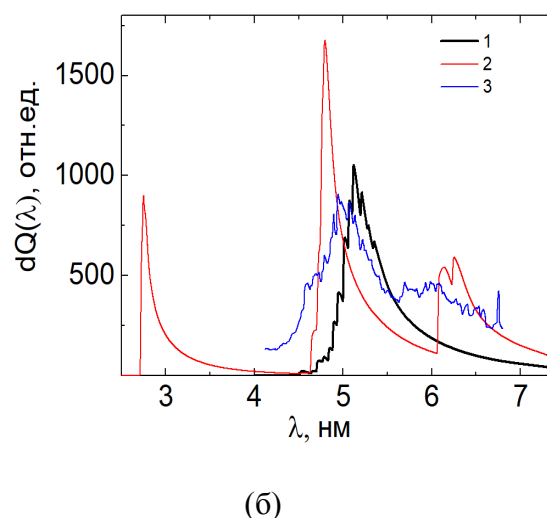
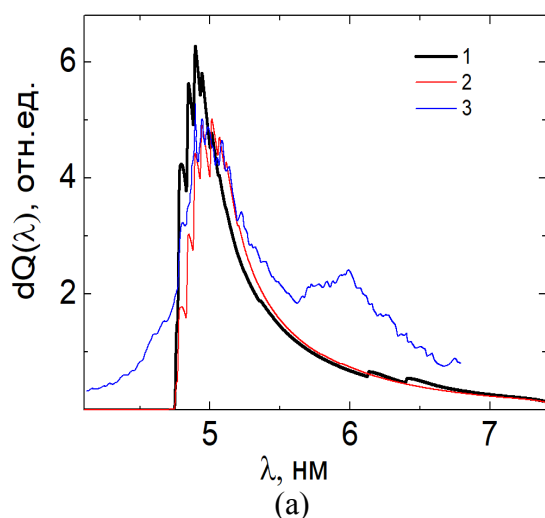


Рис. 3. Спектральное распределение мощности радиационных потерь вольфрама при температуре $T_e=1.5$ кэВ (а) и $T_e=1.5$ кэВ (б). 1 – теоретические расчеты со средним зарядом, рассчитанным в статистической модели; 2 – теоретические расчеты со средним зарядом, рассчитанным по данным работы [8]; 3 – экспериментальные данные LHD [16].

Как экспериментальные данные, так и результаты теоретических расчетов приведены к единому масштабу и представлены в относительных единицах. Видно, что формы экспериментальных и теоретических удельных линейчатых спектральных радиационных потерь, в которых использовалась статистическая модель для расчета распределения примеси по зарядовым состояниям удовлетворительно согласуются друг с другом, что позволяет утверждать, что статистический подход применим для описания спектральных потерь в области 2-8 нм, отвечающей наблюдаемому квазиконтинууму тяжелых ионов в токамаках и стеллараторах. Степень соответствия с экспериментом может заметно варьироваться. Проблема состоит в моделировании электронной плотности сложных электронных конфигураций одним членом слэтеровского разложения, которое улавливает основные особенности спектров. Однако, для описания деталей спектров различных электронных конфигураций одного члена может быть недостаточно. Также наблюдается некоторая разница при использовании различных методов расчета распределений по зарядовым состояниям, особенно при больших температурах.

Были рассчитаны вероятности поуровневых переходов. На рисунках 4а и 4б показаны также положения спектральных линий с их вероятностями радиационных переходов, полученные на основе поуровневых расчетов [16].

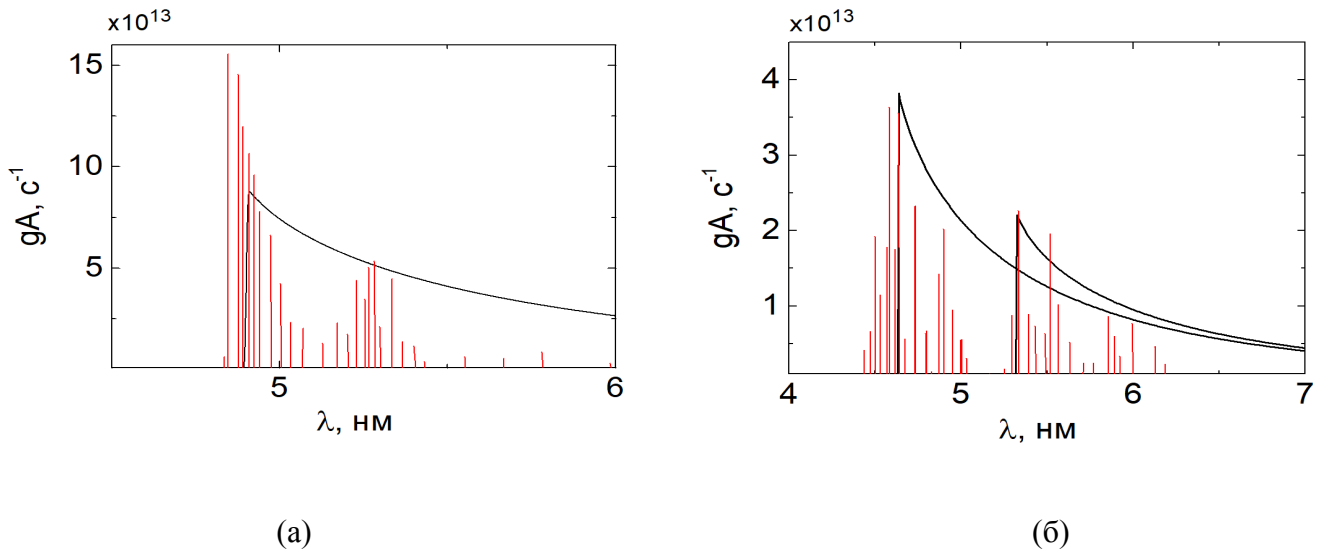


Рис.4. Сравнение статистических распределений коэффициентов Эйнштейна, умноженных на статистический вес с результатами квантовых расчетов, для W^{20+} в переходе $4d^{10}4f^8-4d^94f^9$, а для иона W^{35+} – комбинации переходов $4p^64d^3-4p^54d^4 + 4p^64d^24f$. Вертикальные линии – результаты поуровневых расчетов [16], а огибающие – результаты статистической модели.

Видно, что результаты статистического подхода являются огибающими массива индивидуальных спектральных линий для отдельного иона в соответствии с постановкой задачи в статистической модели. Видно, что массив переходов в ионе вольфрама W^{20+} , отвечающий переходам $4d^{10}4f^8-4d^94f^9$ из одной оболочки описывается также одним распределением атомной электронной плотности слэтеровского типа, тогда как для иона W^{35+} необходим учет двух распределений плотности в соответствии с двумя массивами переходов $4p^64d^3-4p^54d^4 + 4p^64d^24f$. Таким образом подчеркивается, что плазменная модель селективна по структуре электронных оболочек. Кроме того, из рисунков видно хорошее соответствие профилей огибающих, а также абсолютных значений вероятностей переходов ($10^{13} - 10^{14} \text{ c}^{-1}$). Удовлетворительное согласие результатов обоих расчетов указывает на достаточную реалистичность используемой плазменной модели.

Заключение

В данной работе была использована статистическая модель атома для расчета радиационно-столкновительных процессов с участием тяжелых ионов, в частности вольфрама. Применение статистической модели атома значительно упрощает их расчет и позволяет получить универсальное описание многоэлектронных ионов.

- Был произведен расчет скорости диэлектронной рекомбинации тяжелых ионов. Статистическая модель показала, что есть возможность универсального описания процесса диэлектронной рекомбинации для многоэлектронных систем с различным зарядом ядра и при разных температурах. На основе развитой модели создан численный код для расчета скоростей диэлектронной рекомбинации различных химических элементов. Наиболее хорошие результаты, как показало сравнение с данными других численных расчетов, статистическая модель дает для ионов с большим зарядом ядра. Также хорошее соответствие между результатами наблюдается в области больших электронных температур (порядка 100-1000 эВ). В современных термоядерных реакторах достигаются эти температуры, поэтому разработанная модель вполне подходит для описания происходящих в них процессов.
- В рамках статистической модели и Кулон-Борновского приближения были рассчитаны радиационные потери альфа-частиц и дейтронов. Это новый канал потерь энергии частиц, который при больших температурах сопоставим с электронными радиационными потерями. Помимо этого, радиационные потери альфа-частиц были применены к уточнению критических концентраций примеси вольфрама в плазме.
- Был произведен расчет квазиконтинуума тяжелых многоэлектронных ионов. Было показано, что статистическая модель качественно описывает форму спектров и наличие частот отсечки. Также она позволяет строить огибающие спектральных распределений вероятностей переходов внутри иона.

Публикации по теме диссертации

1. **Leontyev D. S.**, Lisitsa V. S. Statistical Model of Dielectronic Recombination of Heavy Ions in Plasmas // *Contr. Plasma Phys.* – 2016. – V. **56**. – P 846-854.
2. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Статистические скорости диэлектронной рекомбинации многоэлектронных ионов в плазме // *ЖЭТФ.* – 2017. – Т. 152. – В. 4. – С. 781-798.
3. **Леонтьев Д. С.** Сопоставление статистических моделей для расчета скорости диэлектронной рекомбинации на тяжелых примесях в термоядерной плазме // *ВАНТ ТС.* – 2017. – Т. 40. – В. 2. – С. 19-22.
4. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Радиационные потери альфа-частиц на тяжелых ионах в термоядерной плазме // *Письма в ЖЭТФ.* – 2017. – Т. 106. – В. 7. – С. 417-421.
5. Krupin V. A., Nurgaliev M. R., Klyuchnikov L. A., **Leontyev D. S.** et al. Experimental study of tungsten transport properties in T-10 plasma // *Nuclear Fusion* –2017. – V.10. – P. 066041.
6. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Статистическая модель квазиконтинуума тяжелых ионов в горячей плазме // *Физика плазмы.* – 2020. – Т. 46. – В. 3. С. 195-205.
7. **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С. QUASILPF // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612088 от 14 февраля 2020.

Материалы конференций:

1. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В.С., Шурыгин В. А. Расчет скорости диэлектронной рекомбинации в статистической модели // Тезисы XLIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2016, С. 194.

2. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Скорость диэлектронной рекомбинации в статистической модели // Тезисы XXV Съезд по спектроскопии, Троицк, 2016, С. 314.
3. Demura A. V., **Leontyev D. S.**, Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Dielectronic recombination rate in statistical model // EPJ Web Conf. V.132, 2017, XXV-th Congress on Spectroscopy, 2016, P. 03028.
4. **Леонтьев Д. С.** Сопоставление статистических моделей для расчета диэлектронной рекомбинации // Тезисы XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная школа, Москва, 2016, С. 233.
5. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Расчет скорости диэлектронной рекомбинации в приближении крамерсовской электродинамики // Тезисы X конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение», Москва, 2016, С. 107.
6. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Розми Ф., Шурыгин В. А. Статистическая модель диэлектронной рекомбинации с распределением электронной плотности Хартри-Фока // Тезисы XLIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2017, С. 210.
7. Demura A. V., **Leontyev D. S.**, Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Radiative losses of alpha particles on tungsten impurities in thermonuclear plasmas // Proc. 44th EPS Conf. on Plasma Physics, Belfast, Northern Ireland, 2017, P4.101.
8. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Статистические модели радиационных потерь альфа-частиц на ионах вольфрама в термоядерной плазме // Тезисы XLV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2018, С. 212.

9. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Применение статистической модели к расчету спектральных радиационных потерь на ионах вольфрама // Тезисы XI конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», Москва, 2018, С. 38.
10. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Квазиконтинуум вольфрама в термоядерной плазме: статистическая модель // Тезисы XLVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2019, С. 76.
11. Demura A. V., **Leontyev D. S.**, Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Statistical modeling of heavy ions quasicontinuum in thermonuclear plasmas // Proc. 46th EPS Conf. on Plasma Physics, Milan, Italy, 2019, P1.1066.
12. Демура А. В., **Леонтьев Д. С.**, Лисица В. С., Шурыгин В. А. Моделирование вероятности переходов ионов вольфрама в рамках статистической теории // Тезисы XLVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2020, С. 268.

Цитируемая литература

1. Brandt W., Lundqvist S. Atomic Oscillations in the Statistical Approximation // Physical Review. – 1965. – Vol. 139. – P. 612–617.
2. Kogan V.I., Kukushkin A.B., Lisitsa V.S. Kramers electrodynamic and electron-atomic radiative-collisional processes // Phys. Rep. – 1992. – Vol. 213. – P. 1–116.
3. Буреева, Л.А., Лисица В.С. Возмущенный атом. М.: ИздАТ, 1997. 463 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В десяти томах. Том III. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Физматлит, 2001. 808 с.

5. Bethe H.A., Salpiter E.E. Quantum mechanics of one- and two-electron atoms. Berlin: Springer-Verlag, 1957. 375 p.
6. Wu Z., Zhang Y., Fu Y. et al. Dielectronic recombination rate coefficients of initially rubidium-like tungsten // Eur. Phys. J. D. – 2015. – Vol. 69. – P.140.
7. Asmussen K., Fournier K., Laming J. et al. Spectroscopic investigations of Tungsten in the EUV region and the determination of ITS concentration in tokamaks // Nucl. Fusion. – 1998. – Vol. 38. – P. 967–986.
8. Pütterich T., Neu R., Dux R. et al. Calculation and experimental test of the cooling factor of tungsten // Nucl. Fusion. – 2010. – Vol. 50. – P.025012.
9. Гервидс В. И., Жидков А. Г., Марченко В. С., Яковленко С. И. Кинетика излучения многозарядных ионов в термоядерной плазме // Вопросы теории плазмы М.: Энергоиздат, 1982. Т. 12. С. 156-202.
10. Демура А.В., Кадомцев А. В., Лисица В. С., Шурыгин В. А. Статистическая модель радиационных потерь тяжелых ионов в плазме // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Т. 98. – В. 12. – С. 886–890.
11. Demura A. V., Kadomtsev M. B., Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Electron impact ionization of tungsten ions in a statistical model // JETP Lett. – 2015. – Vol. 101. – P. 90–93.
12. Demura A. V., Kadomtsev M. B., Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Statistical model of electron impact ionization of multielectron ions // J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. – 2015. – Vol. 48. – P.055701.
13. Demura A. V., Kadomtsev M. B., Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Tungsten ions in plasmas: Statistical theory of radiative-collisional processes // Atoms. – 2015. – Vol. 3. – P. 162–181.

14. Demura A. V., Kadomtsev M. B., Lisitsa V. S., Shurygin V. A. Universal statistical approach to radiative and collisional processes with multielectron ions in plasmas // High Energy Density Phys. – 2015. – Vol. 15. – P. 49–58.
15. Демура А.В., Леонтьев Д.С., Лисица В.С., Шурыгин В.А. Статистические скорости диэлектронной рекомбинации многоэлектронных ионов в плазме // ЖЭТФ. – 2017. – Т. 152. – В. 4. – С. 781-798.
16. Harte C.S., Suzuki C., Kato T. et al. Tungsten spectra recorded at the LHD and comparison with calculations // J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. – 2010. – Vol. 43. – P. 205004.