

Рязанцев Сергей Николаевич

**РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РЕКОМБИНИРУЮЩЕЙ
ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛАБОРАТОРНОЙ АСТРОФИЗИКИ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Пикуз Сергей Алексеевич

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Грум-Гржимайло Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Андреев Степан Николаевич

доктор физико-математических наук
Терехин Владимир Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное
унитарное предприятие «Центральный
научно-исследовательский институт
машиностроения»

Защита состоится “_____” _____ 201__ г. в _____ ч. _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Учреждения Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Автореферат разослан “_____” _____ 201__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Васильев М.М.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2017

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1 Актуальность темы исследования

Рентгеноспектральная диагностика, подразумевающая под собой совокупность экспериментальных методик, направленных на определение параметров высокотемпературной плазмы, в настоящее время широко используется для исследований плазмы, образующейся как в лабораторных экспериментах, так и существующей в различных астрофизических объектах. Излучаемый плазмой спектр зависит от ее характеристик, и ее диагностика осуществляется путем подбора значений плазменных параметров, которые позволяют достичь наилучшего соответствия экспериментального и модельного спектров.

Большинство из рентгеноспектральных методик основано на предположении, что ионизационное состояние плазмы является стационарным, соответствующим данной температуре электронов. Такая ситуация, в частности, реализовывается в рамках исследований по управляемому термоядерному синтезу. При этом в ряде практически важных случаев ионизационное состояние плазмы является нестационарным. Причем нестационарность может быть как ионизационного типа, так и рекомбинационного. Первый тип реализуется на этапе быстрого нагрева плазмы, когда процессы ионизации «не успевают» за процессами нагрева электронов. Такая нестационарность, например, реализуется при нагреве плазмы излучением длинноволнового СО₂-лазера, при вспышках в солнечной короне, в фемтосекундной лазерной плазме. Второй тип нестационарности, рекомбинационная нестационарность, чаще всего возникает, когда процессы рекомбинации оказываются «медленнее» процесса остывания электронов.

Практически всегда нестационарным оказывается ионизационное состояние разлетающихся областей лазерной плазмы. В этом случае плазма является переохлажденной, т.е. рекомбинирующей. Необходимость ее изучения возникла в конце прошлого века, главным образом, в связи с проблемой создания лазеров коротковолнового диапазона. В настоящее время интерес к исследованию лазерной рекомбинирующей плазмы связан с экспериментами по моделированию генерации, распространения и взаимодействия плазменных струй в астрофизических объектах. Мощные ($\sim 10^{39}$ Вт), протяженные (до 2 пк), сколламированные и разнонаправленные плазменные струи наблюдаются во многих активных галактиках, квазарах и старых компактных звездах. Теоретическую основу их лабораторного моделирования составляет факт, что часть законов, описывающих эволюцию плазмы, инвариантны относительно

некоторых преобразований, конкретный вид которых зависит от типа плазмы. Это позволяет сформулировать принципы масштабирования, на основе которых можно проводить прямую аналогию между процессами, происходящими в рекомбинирующей плазме, генерируемой при помощи лазера в твердотельной мишени, и процессами, которые характерны для реальных астрофизических объектов.

В случае плазмы с нестационарным ионизационным состоянием многие из разработанных ранее диагностических методов либо не могут быть использованы вообще, либо для их применения нужно выполнить ряд уточнений. Характерным примером может служить широко известный метод определения температуры плазмы по отношению интенсивностей резонансных линий и их диэлектронных спутников, который в случае рекомбинирующей плазмы может давать абсолютно неверные результаты. В связи с этим дальнейшее развитие методов рентгеноспектральной диагностики плазмы, применимых в случаях нестационарности ее ионизационного состояния, обосновывает актуальность данной работы.

1.2 Цели и задачи работы

Целью данной работы являлась разработка методики рентгеноспектральной диагностики плазмы с нестационарным ионизационным состоянием и ее применение для определения электронной температуры и плотности лазерной плазмы с астрофизическим подобием, образующейся при облучении твердотельных мишеней лазерным излучением с плотностью потока $\sim 10^{13}$ Вт/см², а также сравнение полученных значений параметров с результатами других способов диагностики с целью проверки адекватности предлагаемой методики и создания комплексного описания влияния внешних факторов на разлет лазерной плазмы.

Дополнительной задачей являлось проведение рентгеноспектральной диагностики стационарной плазмы, образующейся при столкновении низкотемпературных плазменных потоков в экспериментах по созданию источника мощного рентгеновского излучения.

1.3 Научная новизна работы

Впервые рассчитаны зависимости от электронной температуры и плотности относительных интенсивностей спектральных линий, излучаемых

рекомбинирующей плазмой, содержащей He-подобные ионы F VIII. На основе этих расчетов впервые предложена методика определения электронной температуры и плотности плазмы с нестационарным ионизационным состоянием. Разработанная методика впервые апробирована при определении параметров плазмы, генерируемой при облучении твердотельных тефлоновых мишеней наносекундным лазерным импульсом. При ее помощи были получены пространственные профили электронной температуры и плотности лазерной плазмы. На основе полученных данных впервые показано, что для плазмы, разлетающейся вдоль полоидальной компоненты внешнего магнитного поля, характерны более высокие значения температуры и плотности, чем для свободно разлетающейся. Продемонстрировано, что к дополнительному росту температуры также приводит наличие в области разлета разреженной плазменной среды. Впервые измерена температура плазмы, получающейся при столкновении ускоренных плазменных потоков на установке 2МК-200.

1.4 Научная и практическая значимость результатов

Предложенная в работе методика рентгеноспектральной диагностики предназначена для исследований широкого класса плазменных объектов с нестационарным ионизационным состоянием, наблюдаемых как в астрофизических объектах, так и при постановке лабораторно-астрофизического эксперимента. Она успешно применяется для интерпретации результатов экспериментов по лабораторному моделированию астрофизических плазменных струй, выполняемых широкой международной коллаборацией на установках в Лаборатории применения интенсивных лазеров (LULI: Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses) в Политехнической школе (Париж, Франция), в Институте Прикладной Физики РАН (Нижний Новгород, Россия), а также в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory) в США. Определяемые при помощи предлагаемой методики значения электронной температуры и плотности позволяют создать комплексное описание гидродинамического разлета генерируемой в этих экспериментах лазерной плазмы, а также проверить степень достоверности результатов других диагностических методик. Полученные данные, экстраполированные при помощи принципов подобия на астрофизические масштабы, позволяют верифицировать предлагаемые в настоящее время модели эволюции космических объектов.

Данные о зависимости электронной температуры плазмы, получаемой при столкновении низкотемпературных плазменных потоков на установке 2МК-200 в Троицком Институте Инновационных и Термоядерных Исследований (г. Москва г. Троицк), от скорости потоков и их компонентного состава, позволяют оптимизировать параметры установки для создания сверхъяркого импульсного рентгеновского источника со значительными размерами излучающей области. Такой источник может быть использован, как для фундаментальных исследований в области ядерной энергетики, так и для создания технологических устройств для упрочнения материалов и деталей вспышками излучения.

1.5 Научные положения, выносимые на защиту

1. Методика определения электронной температуры и плотности плазмы с рекомбинационным типом нестационарности, основанная на анализе относительных интенсивностей переходов резонансной серии He-подобных многозарядных ионов.
2. Количественное описание влияния внешних факторов, а именно сильного магнитного поля и среды распространения в виде плазменного облака низкой плотности, на параметры и характерные особенности разлета плазмы, образующейся в лабораторно-астрофизических экспериментах по моделированию плазменных струй в молодых звездных объектах.
3. Пространственные профили электронной температуры и плотности плазменной струи, образованной при наложении полоидального внешнего магнитного поля напряженностью 20 Т на плазменный факел от тефлоновой мишени, облученной наносекундным лазерным импульсом с фокальным пятном в несколько сотен микрон.
4. Методика и результаты измерения температуры стационарной плазмы, образующейся при столкновении низкотемпературных плазменных потоков, содержащих ионы азота или неона и двигающихся навстречу друг другу со скоростью до 4×10^7 см/с в продольном магнитном поле.

1.6. Личный вклад автора

Автором проведены кинетические расчеты относительных интенсивностей линий He_β, He_γ, He_δ, He_ε, He_ζ резонансной серии He-подобного иона фтора F VIII в рамках квазистационарной столкновительно-

радиационной модели. На основании полученных зависимостей автором предложена рентгеноспектральная методика определения электронной температуры и плотности плазмы с нестационарным ионизационным состоянием.

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментов по лабораторному моделированию астрофизических струй плазмы путем облучения твердотельных тефлоновых мишеней лазерными излучением с плотностью потока на уровне 10^{13} Вт/см². При помощи разработанной методики рентгеноспектральной диагностики автором были получены и интерпретированы пространственные профили электронной температуры и плотности генерируемой лазерной плазмы.

В рамках модели стационарной кинетики автором проведены расчеты относительных интенсивностей ряда спектральных линий H- и He-подобных ионов азота, а также He- и Li-подобных ионов неона. На основании этих расчетных зависимостей автором были получены значения электронной температуры плазмы, образующейся при столкновении низкотемпературных плазменных потоков со скоростями на уровне 4×10^7 см/сек.

1.7. Степень достоверности и апробация работы

Экспериментальные спектры многозарядных ионов, использовавшиеся для диагностики плазмы, были получены при помощи современного измерительного оборудования, обеспечивающего высокое пространственное и спектральное разрешение. Достоверность результатов анализа обеспечивается взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик.

Результаты работы обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

The International School on Ultra-Intense Lasers, Московская область, Russia, 4-9 октября, 2015; Scientific-Coordination Session on "Non-Ideal Plasma Physics", Москва, Россия, 27-28 ноября, 2015; 14th Workshop on Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation, Москва, Россия, 13-15 апреля, 2016; International Conference on High Energy Density Sciences 2016 (HEDS 2016), Иокогама, Япония, 17-20 мая, 2016; 34th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM-2016), Москва, Россия, 18-23 сентября, 2016; X конференция "Современные методы диагностики и их применение", Москва, Россия, 14-16 ноября, 2016; International conference on

Extreme Light Scientific and Socio-Economic Outlook, Париж, Франция, 29-30 ноября, 2016; XXXI International Conference on Equations of State for Matter, пос. Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 1-6 марта 2016; European XFEL Users' Meeting 2017 and DESY Photon Science Users' Meeting 2017, DESY Hamburg and European XFEL, Schenefeld, Germany, 25-27 января 2017; XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, пос. Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 1-6 марта, 2017; 15th Workshop on Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation, г. Москва, 5-7 апреля, 2017; XVII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Звенигород, 13-17 июня, 2017.

1.8. Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из Введения, 4 глав, Заключения и списка литературы. Объем текста диссертации составляет 123 страницы, включая 51 рисунок и 2 таблицы. Библиографический список содержит 139 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана актуальность рассматриваемой проблемы в контексте ее научной и практической значимости, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации и приведен список основных публикаций автора по теме работы.

Глава 1 посвящена современному состоянию исследований в области лабораторной астрофизики – ветви экспериментальной физики, направленной на воспроизведение и изучение астрофизических объектов и явлений в контролируемых условиях. Интенсивное развитие этого направления связано с появлением в конце XX века мощных лазеров и быстрых Z-пинчей, позволяющих осуществлять лабораторное моделирование процессов, происходящих в экстремальных астрофизических условиях с высокой плотностью энергии (**пункт 1.1**).

Одним из объектов лабораторно-астрофизического моделирования являются сколламированные струи плазмы, выбрасываемые из различных астрофизических объектов (см. рис. 1).

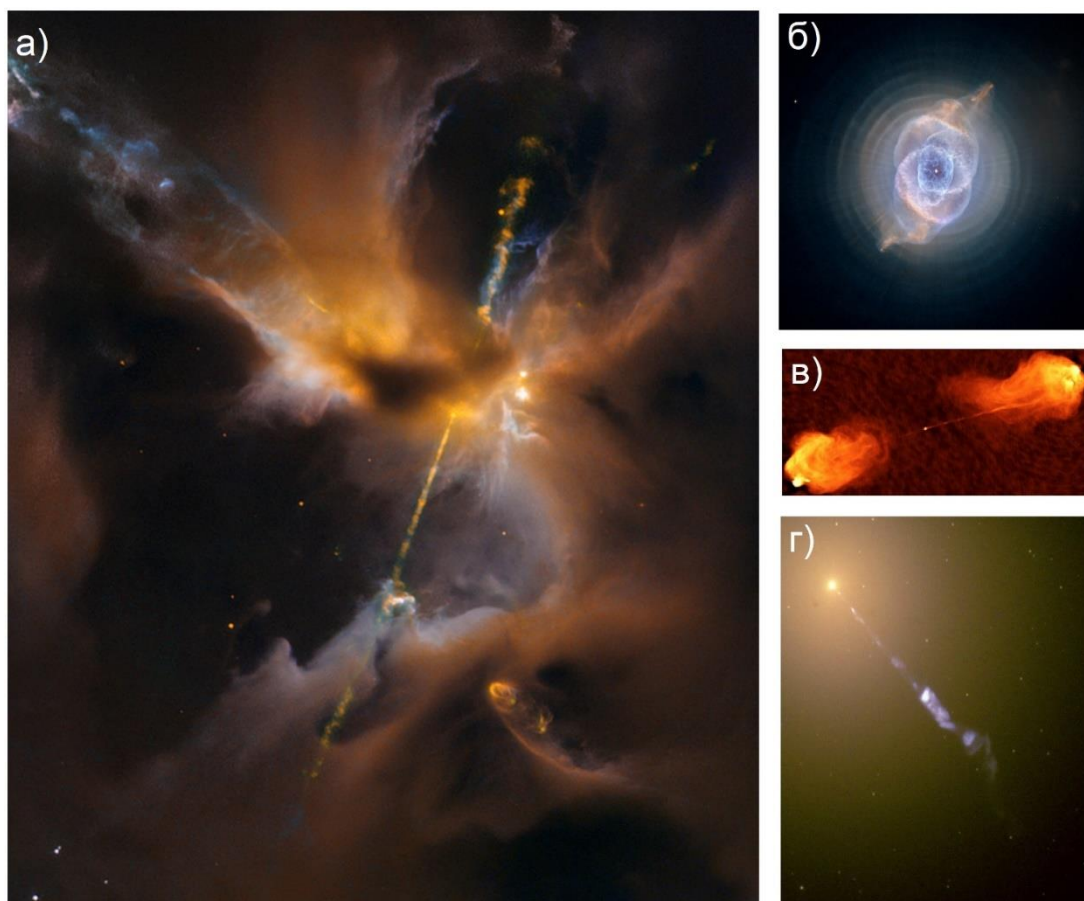


Рис. 1 - а) Полученное при помощи телескопа Хаббл [1] изображение объекта HH (Herbig-Haro) 24 [2], находящегося в пределах Млечного пути в Облаке Ориона на расстоянии 1350 световых лет от Земли. Отчетливо видны две струи вещества, выбрасываемые из центральной области аккреционного облака. б) Туманность Кошачий глаз (NGC-6543), представляет собой остаток звезды, окруженный сброшенными плазменными оболочками. в) Аккреция вещества на черную дыру [3] в виде узкой струи в галактике Лебедь А. г) Образование струи при аккреции вещества на массивный объект в центре галактики M87.

Скорость распространения вещества внутри таких струй варьируется в диапазоне от 100 до 1000 км/с в зависимости от массы ядра формирующейся звезды. Они могут существовать значительные промежутки времени и иметь колоссальные, порядка нескольких парсек, пространственные размеры. Такие крупномасштабные выбросы вещества играют важную роль в эволюции молодых звезд, поэтому их изучение - это ключ к пониманию механизмов распределения массы, энергии и углового момента между плотным центральным ядром и аккреционным облаком на ранних этапах звездной эволюции. Описание причин формирования из выбрасываемой молодой

звездой плазмы узких струй с соотношением длины к диаметру превышающим 10 является одной из основных задач изучения подобных объектов. В **пункте 1.2** приведен обзор работ, в которых в качестве механизма коллимации рассматривается действие полоидальных магнитных полей, существующих как в непосредственной близости, так и на существенных расстояниях от объекта, который является источником струи.

Изучение астрофизических струй только методами наблюдательной астрономии не может дать всеобъемлющего представления о процессах, происходящих в них, так как полный жизненный цикл таких объектов может достигать нескольких тысяч лет. Однако при выполнении определенных условий, так называемых критериев подобия, струи лазерной плазмы, образующиеся при облучении твердотельных мишеней могут быть рассмотрены в качестве модели потоков астрофизической плазмы. К настоящему моменту проведено значительное количество экспериментальных работ, обзор которых приведен в **пункте 1.3**, посвященных созданию узких струй лазерной плазмы при помощи использования мишеней специальной геометрии или структуры (многослойные мишени). Также в пункте обсуждается ряд экспериментов, в которых генерируемая струя распространялась в газовой среде, моделирующей межзвездное вещество.

Как уже говорилось выше, для того чтобы проводить аналогии между астрофизическим плазменным потоком и струей плазмы, созданной в лаборатории, необходимо чтобы последняя удовлетворяла ряду критериев, определяемых в рамках так называемой теории подобия. В 1977 году Коннор и Тэйлор [4] показали, что законы, описывающие эволюцию плазмы, могут быть инвариантны относительно некоторых преобразований. Системы, между которыми происходит переход в результате таких преобразований, называются подобными и, изучая одну из них, можно получить представление о характеристиках процессов, происходящих в другой. Из инвариантности уравнений эволюции следует существование набора величин, так называемых инвариантов, значения которых должны совпадать в подобных системах. В целом, можно выделить два подхода к их определению: размерный (**пункт 1.4.1**) и подход групп симметрий (**пункт 1.4.2**). На основе полученных при помощи того или иного подхода выражений для инвариантов, приведенных в **пункте 1.4.3**, возможно определить порядок величин масштабных параметров лабораторной плазмы, обладающей подобием по отношению к моделируемому астрофизическому объекту. Характерные параметры подобных лабораторной и астрофизических систем приведены в таблице 1.

Характерные скорость, размер и время гидродинамического разлета для наблюдаемых в астрономии плазменных струй МЗО (Молодых Звездных Объектов) и модельных струй создаваемых при воздействии мощных лазерных импульсов.

| Параметр | Астрофизическая струя | Лазерная плазма |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Скорость v , км/с | 300 | 100 |
| Длина струи r , мм | 3×10^{18} | 1 |
| Время разлета t_{hydro} , с | 3×10^{10} | 3×10^{-8} |

Таким образом, в главе 1 показано, что инвариантность магнитогидродинамических уравнений, описывающих эволюции плазмы, дает возможность при соблюдении определенных условий (критериев масштабирования) моделировать астрофизических плазменные потоки струями лазерной плазмы.

Глава 2 посвящена описанию методики определения параметров плазмы с нестационарным ионизационным состоянием, основанной на анализе относительных интенсивностей спектральных линий резонансной серии He-подобных ионов.

В пункте 2.1 предложен способ расчета относительных интенсивностей спектральных линий ионов в плазме с произвольным ионизационным состоянием. В случае оптически тонкой плазмы интенсивности наблюдаемых спектральных линий пропорциональны населенности возбужденных состояний, при радиационном распаде которых происходит их излучение. Сами же населенности в общем случае определяются системой (2.1), приведенной в пункте 2.1.1:

$$\frac{dN_i^Z}{dt} = \sum_{i', Z'} K_{ii'}^{ZZ'} N_{i'}^{Z'}, \quad (2.1)$$

где N_i^Z – населенность i -того уровня иона со спектроскопическим символом Z , а $K_{ii'}^{ZZ'}$ – кинетическая матрица, недиагональные элементы которой дают вероятности переходов между состояниями i', Z' и i, Z за счет всех элементарных актов, а диагональные со знаком минус равны сумме вероятностей переходов из состояния i, Z во все остальные. В приведенных в

диссертации расчетах кинетическая матрица соответствует ударно-излучательной модели, описанной в пункте 2.1.2, в рамках которой учитываются только спонтанные радиационные переходы, автоионизационный распад и переходы, происходящие при электрон-ионных соударениях, а именно возбуждение, девозбуждение и ионизация электронным ударом, тройная и фоторекомбинация.

В пункте 2.1.3 предложен метод решения (2.1) при помощи квазистационарного приближения, в рамках которого эта система разбивается на две подсистемы – алгебраическую систему для всех стационарных уравнений и систему дифференциальных уравнений для основных состояний:

$$\sum_{i',z'} K_{ii'}^{ZZ'} N_{i'}^{Z'} = 0 \text{ для } i \geq 2, \quad (2.2)$$

$$\frac{dN_i^Z}{dt} = \sum_{i',z'} K_{ii'}^{ZZ'} N_{i'}^{Z'} \text{ для } i = 1. \quad (2.3)$$

Населенности возбужденных уровней при квазистационарном подходе представляются в виде суммы:

$$N_i^Z = \beta_i^Z N_e N_1^{Z+1} + S_i^Z N_1^Z, \quad (2.4)$$

где β_m^Z, S_m^Z – коэффициенты заселения уровня m , которые определяются их уравнений (2.5) - (2.6), полученных путем подстановки (2.4) в (2.2)

$$\sum_{i'} K_{ii'}^{ZZ} S_{i'}^Z = -K_{i1}^{ZZ}, \quad i > 1, \quad (2.5)$$

$$\sum_{i'} K_{ii'}^{ZZ} \beta_i^Z = \frac{-K_{i1}^{Z,Z+1}}{N_e}, \quad i > 1. \quad (2.6)$$

При этом для отношения интенсивностей пары линий, обусловленных радиационными переходами $m \rightarrow n$ и $k \rightarrow l$ в случае ионизирующейся плазмы можно написать:

$$\frac{I_{mn}^Z}{I_{kl}^Z} = \frac{A_{mn} S_m^Z}{A_{kl} S_k^Z}, \quad (2.7)$$

а в случае рекомбинирующей:

$$\frac{I_{mn}^Z}{I_{kl}^Z} = \frac{A_{mn} \beta_m^Z}{A_{kl} \beta_k^Z} \quad (2.8)$$

где A_{mn} и A_{kl} — вероятности соответствующих радиационных переходов.

Уравнения (2.5) – (2.6) были решены для He-подобного иона F VIII. Результаты расчетов приведены в **пунктах 2.2, 2.3**. Решение проводилось в соответствии с расчетной моделью, описанной в **пункте 2.1.1**, в рамках которой скорости элементарных актов вычислялись при помощи выражений, приведенных в **пункте 2.2.2**. На основании полученных решений в соответствии с (2.7) – (2.8) были рассчитаны зависимости относительных интенсивностей линий He_β , He_γ , He_δ , He_ϵ , He_ζ от электронной температуры и плотности в широком диапазоне значений этих параметров. Зависимости отношений $\text{He}_\gamma/\text{He}_\beta$ и $\text{He}_\delta/\text{He}_\beta$ для рекомбинирующей и ионизирующей плазмы приведены на рис. 2:

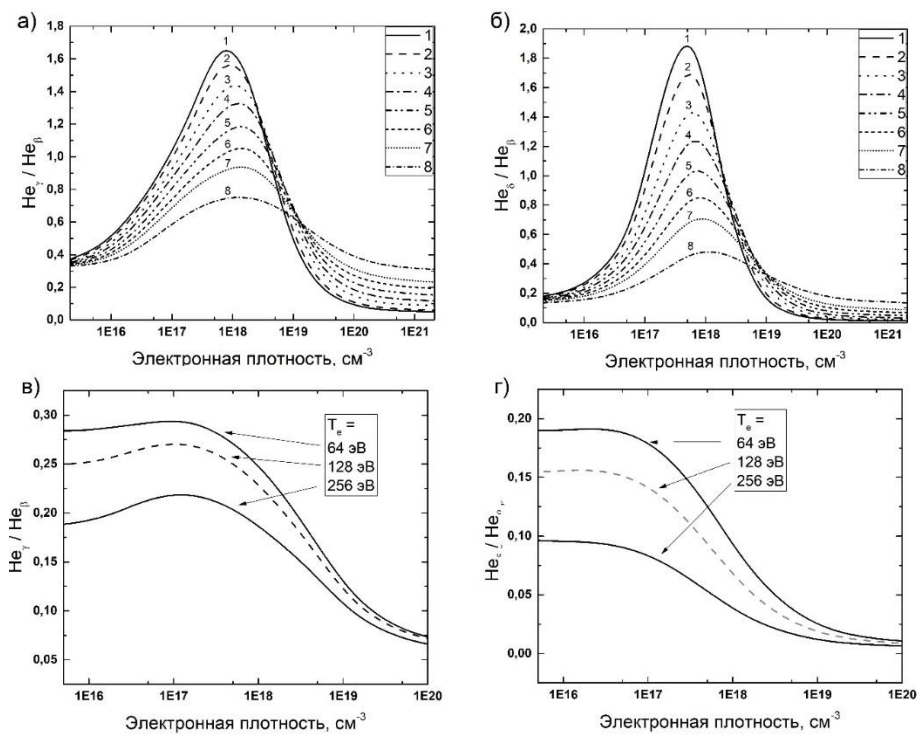


Рис. 2 - Зависимость от электронной плотности плазмы отношения интенсивностей линий He_γ ($1s4p \ ^1P_1 - 1s^2$) и He_β ($1s3p \ ^1P_1 - 1s^2$), а также He_δ ($1s5p \ ^1P_1 - 1s^2$) и He_β для а)-б) рекомбинирующей и в)-г) ионизирующей плазмы при различных значениях электронной температуры: (1) - $T_e = 9.6$ эВ, (2) - $T_e = 12.8$ эВ, (3) - $T_e = 19.2$ эВ, (4) - $T_e = 25.6$ эВ, (5) - $T_e = 35.2$ эВ, (6) - $T_e = 44.8$ эВ, (7) - $T_e = 64$ эВ, (8) - $T_e = 128$ эВ.

Из приведенных рисунков видно, что отношения интенсивностей линий ионов фтора чувствительны к электронной плотности плазмы в области $N_e \sim 10^{16} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при температурах $T_e \sim 10 - 100 \text{ эВ}$. За пределами этого диапазона плотностей отношения интенсивностей для иона F VIII становятся постоянными и не могут быть использованы для диагностики. В **пункте 2.4** показано, что при необходимости проведения диагностики в другом диапазоне плотностей можно использовать спектральные линии других He-подобных ионов, либо ионы другой кратности. Поскольку при $Z \sim 10$ вероятности атомных переходов в He-подобных ионах должны масштабироваться вдоль изоэлектронной последовательности по тем же законам, что и для H-подобных, то области чувствительности относительных интенсивностей к температуре и плотности плазмы при этом сместятся пропорционально $(Z_n-1)^2$ и $(Z_n-1)^7$, соответственно.

Таким образом, в **главе 2** показано, что относительные интенсивности линий He-подобного иона чувствительны к электронной плотности в диапазоне $10^{15} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при электронных температурах от $10 - 100 \text{ эВ}$ и могут быть использованы для диагностики этих параметров.

Глава 3 посвящена экспериментам по моделированию процессов формирования и распространения астрофизических струй вещества путем облучения твердотельных мишеней мощными лазерными импульсами.

Для изучения влияния магнитных полей на разлет лазерной плазмы, моделирующей астрофизические плазменные струи, на базе лазерной установки ELFIE в Политехнической школе во Франции была реализована экспериментальная сборка (см. рис.3), позволяющая создавать в области распространения плазмы однородное магнитное поле с индукцией вплоть до 40 Тл. Необходимость создания столь сильных полей обоснована в **пункте 3.1**. Из приведенных в пункте оценок следует, что для коллимации потока лабораторной плазмы с электронной плотностью на уровне $10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и температурами в несколько сотен эВ необходимо использовать поля с индукцией магнитного поля из диапазона 5 - 50 Тл.

В **пункте 3.2** детально описаны все подсистемы экспериментальной сборки. Для создания лазерной плазмы тефлоновая мишень облучалась импульсом наносекундной длительности с полной энергией 15-40 Дж, который фокусировался в пятно размером сотни микрон, что позволяло создать плотность потока излучения на мишени на уровне 10^{13} Вт/см^2 . При помощи катушек Гельмгольца, работающих в импульсном режиме, в области разлета плазмы создавалось однородное магнитное поле с индукцией 20 Тл, силовые линии которого были направлены перпендикулярно к мишени.

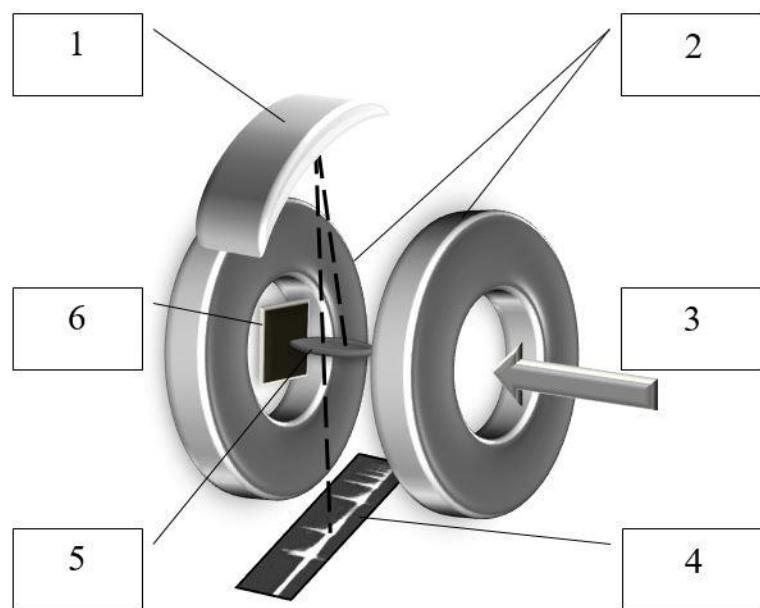


Рис. 3 - Схематическое изображение экспериментальной установки. 1 – диспергирующий элемент спектрометра (кристалл слюды), 2 – катушки Гельмгольца, 3 – направление лазерного излучения, 4 – флуоресцентная пластина, 5 – плазма, 6 – мишень.

Электронная плотность определялась при помощи широко известной интерферометрической схемы Маха-Цандера. Рентгеновские спектры плазмы регистрировались при помощи фокусирующего спектрометра с пространственным разрешением (ФСР). В качестве диспергирующего элемента спектрометра использовался сферически изогнутый кристалл слюды с межплоскостным расстоянием $2d = 19.9149 \text{ \AA}$ и радиусом кривизны $R = 150 \text{ мм}$. Регистрация спектра проводилась на фотолюминесцентные пластины Image Plate TR, размещавшиеся в защищенной от оптического излучения кассете. Характерные рентгеновские спектры, зарегистрированные при помощи ФСР, приведены на рис. 4.

Характерной особенностью наблюдаемых спектров на удалении от мишени является возрастание интенсивностей линий $He_\gamma, He_\delta, He_\epsilon, He_\zeta$ относительно линий He_β . Уже на расстоянии 1 мм от мишени интенсивность линия He_γ приблизительно равна интенсивности He_β , а на бóльших удалениях начинает превышать ее. На рис. 5 показаны модельные спектры для ионизирующейся (рис. 5а) и рекомбинирующей плазмы (рис. 5б). Из сравнения экспериментальных спектров с модельными видно, что наблюдаемая конфигурация спектра является характерной для рекомбинирующей плазмы. В связи с этим для диагностики ее параметров может быть применена рентгеноспектральная методика, описанная в Главе 2.

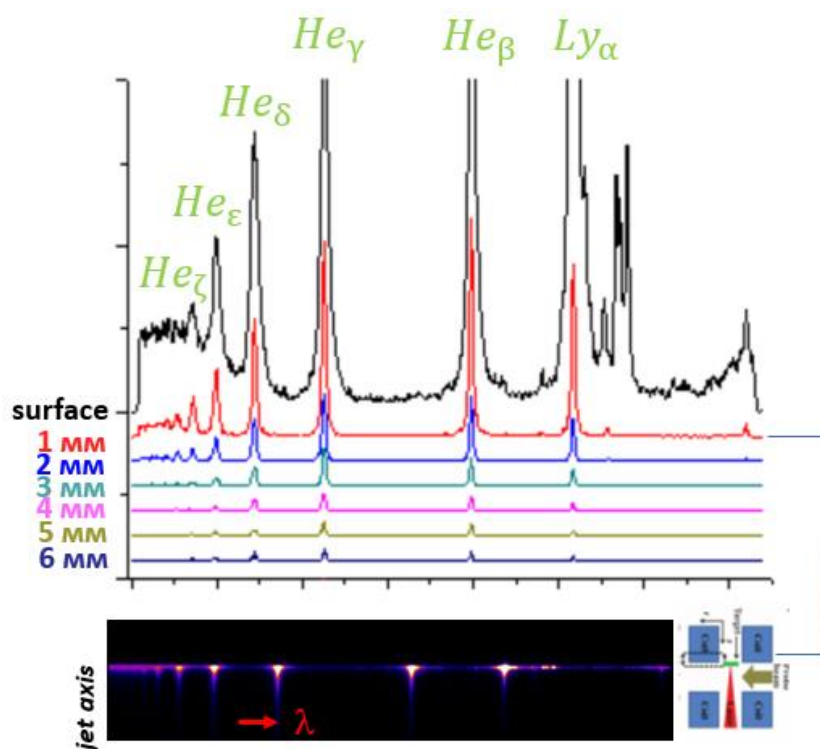


Рис. 4 – Рентгеновские спектры плазмы, содержащей многозарядные ионы фтора, полученные на различных расстояниях от мишени. В нижней части рисунка показано исходное изображение спектра с пространственным разрешением вдоль направления разлета плазменной струи от поверхности мишени (направление сверху вниз), полученное после сканирования флуоресцентной пластины.

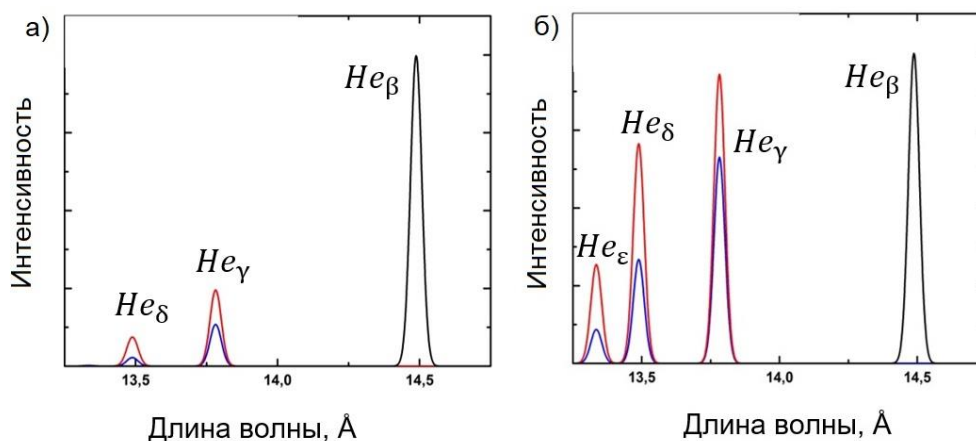


Рис. 5 – Модельные спектры плазмы, состоящей из многозарядных ионов фтора, с а) ионизационной и б) рекомбинационной нестационарностью, рассчитанные для двух разных значений электронной плотности: 10^{18} см^{-3} (красная линия) и 10^{19} см^{-3} (синяя линия).

В пункте 3.3 рассмотрено влияние внешних магнитных полей на разлет лазерной плазмы. В отсутствие магнитного поля наблюдается квазисферический разлет плазмы при котором электронная плотность и температура довольно быстро спадает с расстоянием от мишени (см. рис. 6).

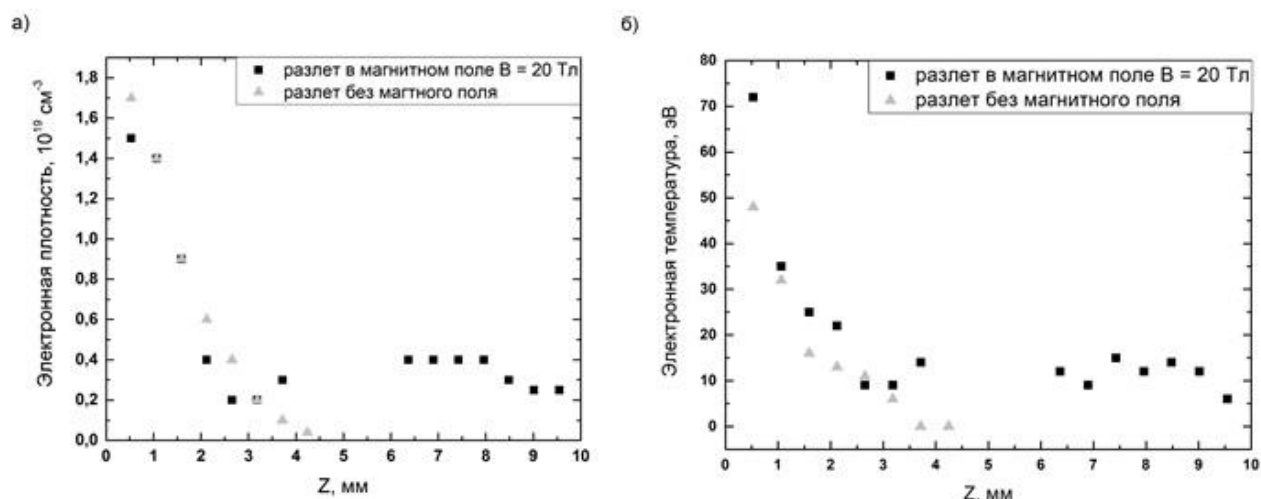


Рис. 6 – Профили электронной а) плотности и б) температуры для свободного разлета (серые треугольники) и замагниченной плазмы (черные квадраты), полученные на больших расстояниях от мишени при помощи рентгеноспектральной диагностики.

С появлением магнитного поля динамика разлета существенно изменяется. Плазма сжимается магнитным полем и формируется в узкую струю (см. рис. 7). При это в плазме отчетливо прослеживаются три характерные области: «полость» (зона пониженной электронной плотности) внутри плазменного факела, зона распространения конической ударной волны и область, где плазма распространяется в виде коллимированной струи. Из-за процесса коллимации значения электронной плотности сохраняется на уровне 10^{18} cm^{-3} на расстояниях вплоть до 18 мм.

На расстояниях, на которых при свободном разлете светимость плазмы в рентгеновском диапазоне фактически прекращается, плотность замагниченной плазмы достигает значений на уровне $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, а электронная температура ~ 10 эВ, после чего происходит незначительный рост обоих параметров с выходом на плато на уровне $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ для плотности и ~ 15 эВ для температуры (см. рис. 6). Постоянство значений сохраняется вплоть до расстояний 8-9 мм. Скачок электронной температуры и плотности

на расстоянии 4 мм от мишени связан с формированием в этой области конической ударной волны, образующейся при столкновении аксиально симметричных потоков плазмы, разворачиваемых магнитным полем в сторону центральной оси.

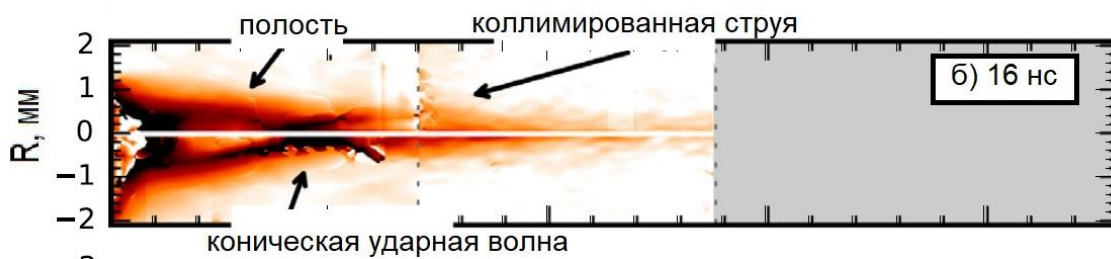


Рис. 7 – Карта электронной плотности, полученная при разлете плазмы в однородном магнитном поле с индукцией 20 Тл через 16 нс после облучения мишени лазерным импульсом. Силовые линии поля направлены к мишени и перпендикулярны ее поверхности (справа налево в плоскости рисунка).

В пункте 3.4 рассмотрен разлет плазмы при аналогичных параметрах внешнего магнитного поля в плазменной среде, которая создавалась лазерным импульсом малой энергии (3 Дж), приходящим на мишень за несколько наносекунд (9 или 19) до основного импульса. Электронная температура плазмы определялась при помощи методики рентгеноспектральной диагностики, описанной в главе 2. Полученные пространственные профили приведены на рис. 8. Из них видно, что влияние внешней среды проявляется в увеличении электронной температуры плазмы на всех расстояниях от мишени, причем величина роста определяется длительностью задержки между основным и предварительным импульсом.

Таким образом в третьей главе показано, что взаимодействие лазерной плазмы с внешним магнитным полем и остаточной плазменной средой изменяет геометрию разлета лазерной плазмы, что сопровождается повышением электронной температуры и плотности.

В экспериментах, описанных в главах 2 и 3, рассматривалась нестационарная плазма. Однако в ряде случаев, например, в области столкновения плазменных потоков, плазма может существовать достаточно долго до установления стационарных значений параметров. Исследование такой плазмы рассмотрено в главе 4.

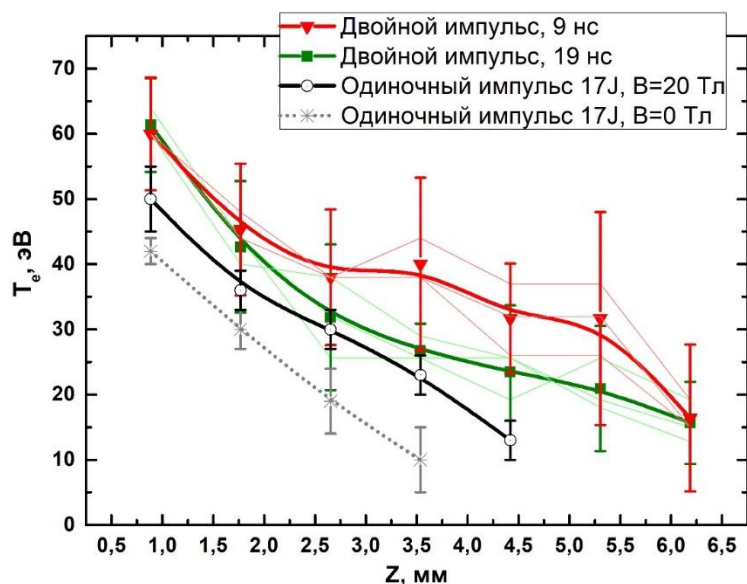


Рис. 8 – Профили электронной температуры плазмы для свободного разлета (серая кривая, соединяющая звездочки), для разлета в вакууме во внешнем магнитном поле с индукцией 20 Тл (черная кривая, соединяющая кружки), разлет в плазменной среде, созданной прекурсором за 19 нс до прихода основного импульса (зеленые квадраты) и за 9 нс (красные треугольники) в магнитном поле с индукцией 20 Тл.

Одним из способов генерации мощного вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения (ВУФ и МРИ) является преобразование кинетической энергии двух плазменных потоков, при их встречном столкновении, в энергию эмитируемых при этом фотонов высокой энергии. При этом для достижения максимальной эффективности работы такого источника и оптимизации его работы необходимо проводить измерения полного спектра параметров высокотемпературной плазмы, генерируемой при столкновении потоков, в особенности, электронной температуры и плотности. С этой целью на базе ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Москва г. Троицк) был создан экспериментальный стенд, детальное описание которого приведено в **пункте 4.1**. Он состоит из двух плазменных ускорителей (**пункт 4.1.1**), внутри которых низкотемпературные плазменные потоки, содержащие ионы неона или азота, движутся навстречу друг другу со скоростями на уровне 10^7 см/сек. В проведенном эксперименте в области столкновения потоков образовывалась высокотемпературная плазма, рентгеновское излучение которой детектировалось при помощи спектрометра на основе пропускающей решетки (**пункт 4.1.2**), настроенного на диапазон длин волн от 1 до 30 нм. Характерные спектры излучения азотосодержащей или неонсодержащей плазмы,

зарегистрированные в описываемых в главе экспериментах, приведены на рис. 9.

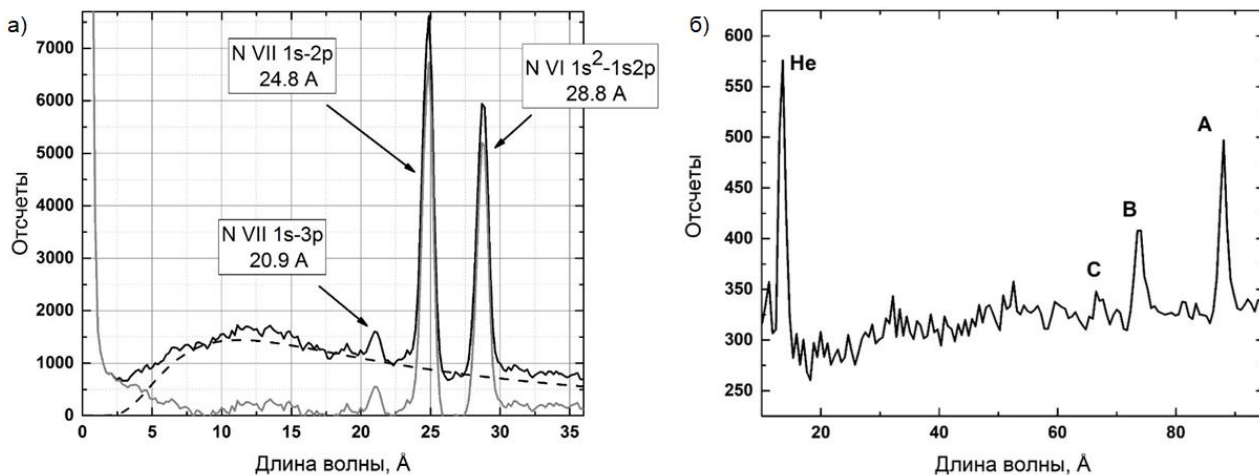


Рис. 9 – а) Экспериментальный спектр плазмы, содержащей ионы азота (черная сплошная линия); Аппроксимация непрерывной части спектра (черная пунктирная линия); Результат вычитания (серая сплошная линия) непрерывной части из спектра. б) Экспериментальный спектр плазмы, содержащей ионы неона. Расчетные данные представляют собой сумму линейчатого и непрерывного излучения. Обозначения линий: А – 3p-2s, В – сумма 4s-2p и 4d-2p, С – сумма 4p-2s, 5s-2p и 5d-2p в ионах Ne VIII, He – 1s2p-1s² в ионах Ne IX.

Определение параметров плазмы проводилось путем сравнения экспериментального спектра с расчетным и подбора таких параметров расчета, при которых достигалось наилучшая степень соответствия между ними. Расчет теоретических значений относительных интенсивностей спектральных линий, используемых для диагностики, проводился в рамках модели стационарной кинетики. Ее использование вполне оправдано, так как в соответствии с оценками, приведенными в пункте 4.2, время выхода населенностей уровней ионов на стационарные значения составляет 1-2 мкс, что в несколько раз ниже экспериментально измеренного времени существования плазмы в месте столкновения равного 12-14 мкс.

Для диагностики неонсодержащей плазмы наиболее удобными оказалось отношение интенсивностей резонансной линии He-подобного Ne (переход 1s2p - 1s² в Ne IX, $\lambda = 13.4 \text{ \AA}$) и линии 3p-2s Li-подобного Ne VIII (переход 1s²3p - 1s²2s в Ne VIII, $\lambda = 88.1 \text{ \AA}$). В случае азотосодержащей плазмы использовались отношения интенсивностей резонансных линий He- и H-

подобных ионов N VI, VII, а именно Ly_α (переход $2p - 1s$ в N VII, $\lambda = 24.8 \text{ \AA}$), Ly_β (переход $3p - 1s$ в N VII, $\lambda = 20.9 \text{ \AA}$) и He_α (переход $1s2p - 1s^2$ в N VI, $\lambda = 28.8 \text{ \AA}$). Зависимости всех указанных отношений от электронной температуры при различных значениях электронной плотности приведены на рис. 10

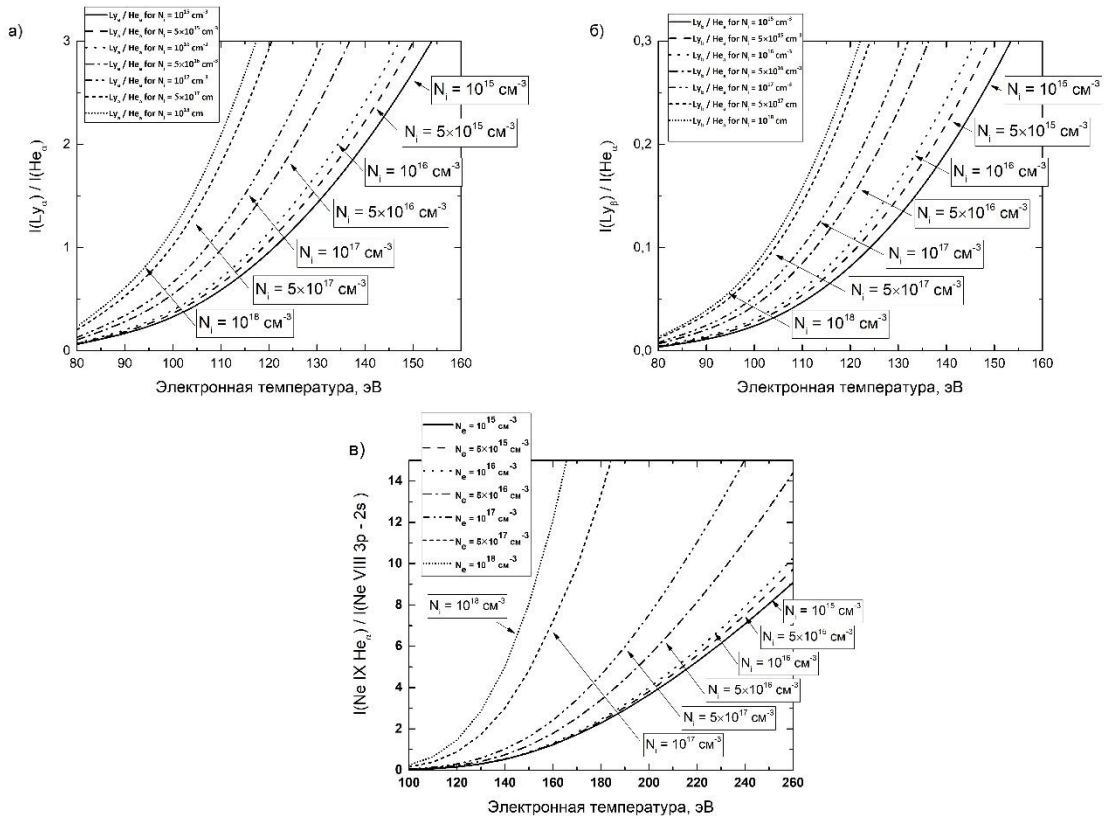


Рис. 10 – расчетные зависимости отношения интенсивностей линий а) Ly_α (переход $2p - 1s$ в N VII, $\lambda = 24.8 \text{ \AA}$) и He_α (переход $1s2p - 1s^2$ в N VI, $\lambda = 28.8 \text{ \AA}$), б) Ly_β (переход $3p - 1s$ в N VII, $\lambda = 20.9 \text{ \AA}$) и He_α от электронной температуры при различных значениях ионной плотности. в) - расчетные зависимости отношения интенсивностей резонансной линии He-подобного неона He_α (переход $1s2p - 1s^2$ в Ne IX, $\lambda = 13.4 \text{ \AA}$) и линии $3p-2s$ Li-подобного NeVIII (переход $1s^23p - 1s^22s$ в Ne VIII, $\lambda = 88.1 \text{ \AA}$) от электронной температуры при различных значениях ионной плотности.

Из анализа экспериментальных значений относительных интенсивностей указанных линий, проведенного в пункте 4.3, следует, что в месте столкновения низкотемпературных плазменных потоков со скоростями $4 \times 10^7 \text{ см/с}$, образуется плазма с электронной температурой 100-120 эВ в случае плазмы, содержащей ионы азота, и 130 – 160 эВ для плазмы содержащей ионы

неона, что, в целом, согласуется с предварительными теоретическими оценками.

Следует отметить, что каждое экспериментальное значение какого-то одного отношения интенсивностей линий соответствует целому набору теоретических пар значений электронной температуры и плотности, при которых расчетный спектр будет обладать теми же характеристиками, что и экспериментальный. В пункте 4.4 показано, что при использовании нескольких пар линий можно избежать этой неоднозначности.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана методика определения электронной температуры и плотности плазмы с рекомбинационным типом нестационарности, основанная на анализе относительных интенсивностей переходов резонансной серии He-подобных многозарядных ионов.
2. Использование предложенной методики при анализе рентгеновских спектров плазмы, полученных в рамках лабораторно-астрофизических экспериментов по моделированию плазменных струй в молодых звездных объектах путем облучения твердотельных мишеней мощными лазерными импульсами, позволило количественно описать влияние внешних факторов на параметры и характерные особенности разлета образующейся в результате такого взаимодействия плазмы.
3. Рентгеноспектральным методом определены пространственные профили электронной температуры и плотности плазменной струи, образованной при наложении полоидального внешнего магнитного поля напряженностью 20 Т на плазменный факел от тефлоновой мишени, облученной наносекундным лазерным импульсом с фокальным пятном в несколько сотен микрон. Показано, что электронная температура на уровне 10-15 эВ сохраняется на расстоянии до 10 мм от мишени.
4. Показано, что относительные интенсивности спектральных линий He- и H-подобных ионов азота N VI, VII и Li- и He-подобных ионов неона Ne могут использоваться для измерения температуры и плотности плазмы со стационарным ионизационным состоянием в широком диапазоне температур и плотностей.
5. Продемонстрировано, что при столкновении потоков низкотемпературной плазмы, содержащих ионы азота или неона, двигавшихся навстречу друг другу со скоростью до 4×10^7 см/с в продольном магнитном поле, формируется плазма многозарядных

ионов с электронной температурой 100-120 эВ для азотосодержащей плазмы и 160-170 эВ для неоносодержащей. Электронная плотность плазмы в месте столкновения находится в диапазоне 10^{15} - 10^{18} см⁻³.

3. ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По материалам диссертации опубликовано 9 работ. Все работы из нижеследующего списка опубликованы в журналах, включенных в систему цитирования Web of Science:

1. Diagnostics of laser-produced plasmas based on the analysis of intensity ratios of he-like ions x-ray emission / S. N. Ryazantsev, I. Y. Skobelev, A. Y. Faenov et al. // *Physics of Plasmas*. — 2016. — Vol. 23. — P. 123301(1)–123301(7)
2. X-ray spectroscopy diagnostics of a recombining plasma in laboratory astrophysics studies / S. N. Ryazantsev, I. Y. Skobelev, A. Y. Faenov et al. // *JETP Letters*. — 2015. — Vol. 102, no. 11. — P. 707–712
3. Detailed characterization of laser-produced astrophysically-relevant jets formed via a poloidal magnetic nozzle / D. P. Higginson, G. Revet, B. Khair et al. // *High Energy Density Physics*. — 2017. — Vol. 23. — P. 48–59.
4. Plasma diagnostics from intensities of resonance line series of he-like ions / S. N. Ryazantsev, I. Y. Skobelev, A. Y. Faenov et al. // *Plasma Physics Reports*. — 2017. — Vol. 43, no. 4. — P. 480–485
5. Laboratory unravelling of matter accretion in young stars / G. Revet, S.N. Chen, R. Bonito, B. Khair et al. // *Science Advances*. — 2017. — Vol. 3. — accepted
6. Твердотельные трековые детекторы в исследованиях лазерной плазмы / С. А. Пикуз мл, И. Ю. Скобелев, А. Я. Фаенов и др. // *Теплофизика высоких температур*. — 2016. — Т. 54, № 3. — С. 453–474.
7. Diagnostics of recombining laser plasma parameters based on he-like ion resonance lines intensity ratios / S. N. Ryazantsev, I. Y. Skobelev, A. Y. Faenov et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 774, no. 1. — P. 012116
8. Parameters of supersonic astrophysically-relevant plasma jets collimating via poloidal magnetic field measured by x-ray spectroscopy method / E. D. Filippov, S. A. Pikuz, I. Y. Skobelev et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — Vol. 774, no. 1. — P. 012114
9. X-ray diagnostics of plasma generated during collisions of plasma flows / V.V. Gavrillov, A.G. Eskov, A.M. Zhitlukhin, D.M. Kochnev et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — accepted

Рязанцев Сергей Николаевич
РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РЕКОМБИНИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ
ЗАДАЧ ЛАБОРАТОРНОЙ АСТРОФИЗИКИ.

Автореферат

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Печать офсетная

Уч.-изд.л.

Усл.-печ.л.

Тираж 100 экз.

Заказ N

Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2