



ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТРОИЦКИЙ ИНСТИТУТ ИННОВАЦИОННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12, Телеграф/телекс: 206178 LINER RU,
Телеграф: г. Москва, г. Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Телефакс: +7(495) 841-57-76; E-mail: liner@trinit.ru; WEB-сервер: www.trinit.ru
ОКПО:08624272; ОГРН:1157746176400; ИНН/КПП: 7751002460/775101001

№ _____

на _____

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Рязанцева Сергея Николаевича «Рентгеноспектральная диагностика рекомбинирующей плазмы для задач лабораторной астрофизики», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - Физика плазмы.

Диссертационная работа Сергея Николаевича Рязанцева, изложенная в автореферате, посвящена развитию рентгеноспектральных методов диагностики высокотемпературной плазмы, образующейся при взаимодействии мощного лазерного излучения с мишенями твердотельной плотности. Тема диссертации безусловно очень важна и **актуальна**, т.к. рентгеновское излучение короткоживущей горячей и плотной плазмы зачастую является чуть ли не единственным достоверным источником информации о параметрах плазмы и протекающих в ней процессах. А эти данные, в свою очередь, принципиально важны для успешной реализации инерциального термоядерного синтеза, адекватного моделирования астрофизических процессов и явлений, исследования поведения различных веществ в условиях экстремальных энергетических нагрузок и других физических и практических применениях.

В настоящее время в большинстве рентгеноспектральных методик, с помощью которых определяются параметры плазмы (в первую очередь - электронная температура и плотность) в той или иной степени предполагается стационарное ионизационное состояние исследуемого объекта. Высокая степень **научной новизны** диссертационной работы Рязанцева С.Н., на мой взгляд, состоит в том, что в ней приводятся результаты проведенных впервые расчетов зависимостей от электронной температуры и плотности плазмы относительных интенсивностей различных спектральных линий, излучаемых рекомбинирующей плазмой, состоящей из гелие-подобных ионов фтора. А на основе этих расчетов впервые предложена методика определения электронной температуры и плотности плазмы с нестационарным ионизационным состоянием. Необходимо также отметить, что сам факт определения параметров вещества в таком неординарном объекте как струи в лазерной плазме является сам по себе в определенной степени пионерским.

Короткоживущие струйные течения в плазме являются чрезвычайно сложным для изучения явлением ввиду короткого времени жизни, не очень высокой электронной температуры, но достаточно высокой плотности. Поэтому использование других диагностических методик для тестирования результатов, полученных автором диссертационной работы, было, конечно же, чрезвычайно затруднено. Однако в ряде случаев Рязанцеву С.Н. эту трудность удалось успешно преодолеть. Отмечу также, что в диссертационную работу не вошло сравнение экспериментальных данных об электронной температуре плазмы в месте столкновения плазменных потоков на установке 2МК-200 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), полученных

автором диссертационной работы рентгеноспектральным методом и результатами, полученными другим рентгеновским диагностическим методом – т.н. «методом фильтров», основанным на регистрации непрерывного излучения плазмы. Это сопоставление показало достаточно хорошее согласие полученных двумя разными методами данных. На мой взгляд, **достоверность** полученных в диссертационной работе результатов не вызывает сомнения.

Разработанная в работе методика рентгеноспектральной диагностики предназначена для изучения очень широкого класса плазменных объектов с нестационарным ионизационным состоянием, наблюдаемых как в астрофизических объектах, так и при постановке лабораторно-астрофизического экспериментов. В настоящее время она уже успешно применяется для интерпретации результатов экспериментов по лабораторному моделированию астрофизических явлений, выполняемых широкой международной коллаборацией на лазерных установках во Франции, России и США. Полученные данные, экстраполированные при помощи принципов подобия на астрофизические масштабы, позволяют верифицировать предлагаемые в настоящее время модели эволюции космических объектов. Все это свидетельствует о высокой степени **практической значимости** работы. Нет сомнения, что результаты работы Рязанцева С.Н. и в дальнейшем будут успешно применяться в этих исследованиях. Уверен, что методика, развитая диссертантом, может быть использована для диагностики плазмы и в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу.

В качестве недостатка автореферата не могу не отметить некоторую небрежность, проявленную автором при его оформлении. Это касается языка и иллюстраций. Например, иногда употребляются жаргонные выражения, такие как «излучаемый плазмой спектр...» в первом же абзаце автореферата. А пассаж в самом конце с.18 изложен так, что его вообще очень трудно понять. На Рис.4 надо было бы определить ось абсцисс, а на Рис.6 показать экспериментальную ошибку.

Однако указанный недостаток ни в коем случае не умаляет достоинств диссертационной работы. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

В целом диссертация по актуальности, достоверности, научной новизне и практической значимости результатов представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Рязанцев Сергей Николаевич несомненно заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Отзыв составил начальник лаборатории исследования эмиссии плазмы Отделения магнитных и оптических исследований ГНЦ РФ ТРИНИТИ Госкорпорации «Росатом» доктор физ.-мат. наук Гаврилов Валерий Васильевич.

108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12.

Телефон: 8-903-217-4840

E-mail: vvgavril@triniti.ru

«25» ноября 2017 г. В.В. Гаврилов В.В. Гаврилов

Подпись Гаврилова Валерия Васильевича **ЗАВЕРЯЮ.**

Ученый секретарь ГНЦ РФ ТРИНИТИ,
кандидат физ.-мат. наук



А.А. Ежов А.А. Ежов

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико–математических наук,
ученого секретаря ФБГУН Института общей физики
им. А.М. Прохорова РАН Андреева Степа́на Николаевича
на диссертационную работу Рязанцева Сергея Николаевича

«Рентгеноспектральная диагностика рекомбинирующей плазмы для задач
лабораторной астрофизики»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.08 – физика плазмы.

В диссертации Рязанцева С.Н. рассматривается методика определения электронной температуры и плотности рекомбинирующей плазмы при помощи анализа относительных интенсивностей спектральных линий многозарядных ионов. Метод был использован автором для определения параметров лазерной плазмы, образующейся в экспериментах по моделированию астрофизических плазменных струй.

Разработка новых методик спектроскопической диагностики является важным направлением развития экспериментальной физики. В связи с этим диссертационная работа Рязанцева С.Н. по разработке **новой** методики рентгеноспектральной диагностики плазмы с нестационарным ионизационным состоянием безусловно является **актуальной**.

Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения:

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, описаны научная новизна и практическая значимость разработанной методики рентгеноспектральной диагностики плазмы, рассмотрен личный вклад автора, а также приведены основные положения, выносимые на защиту, и публикации Рязанцева С.Н. по теме диссертации.

В первой главе рассмотрено современное состояние сравнительно молодой области исследований – лабораторной астрофизики. В целом, данная область направлена на изучение астрофизических объектов путем их моделирования в лабораторных условиях. В частности, при соблюдении определенных условий становится возможным моделировать астрофизические плазменные потоки при помощи лазерной плазмы. Конкретный вид этих условий определяется так называемой теорией подобия, краткое описание которой приведено в отдельном пункте. Экспериментально потоки лабораторной плазмы подобные астрофизическим были получены в ряде работ, обзор которых приведен в конце главы. В этих экспериментах вытянутые потоки лазерной плазмы генерировались

при помощи облучения лазерными импульсами конусообразных и многослойных мишеней.

Во второй главе рассмотрено решение системы уравнений для населенностей энергетических уровней гелиеподобного иона F VIII при помощи квазистационарного приближения. В большинстве случаев время выхода значений населенностей основных состояний на стационарные значения существенно больше значений для возбужденных состояний. Это позволяет для возбужденных уровней систему дифференциальных кинетических уравнений для населенности заменить на систему алгебраических, что существенно упрощает ее решение. Полученная подобным образом система была решена как для случая рекомбинирующей плазмы, так и для случая ионизирующейся. На основе полученных значений для широкого диапазона электронных температур и плотностей автором были рассчитаны значения отношений интенсивностей 5 линий резонансной серии гелиеподобного фтора. Аналогичные зависимости для случая произвольного водородоподобного иона со спектроскопическим символом Z могут быть получены при помощи формул, приведенных в конце главы.

Полученный во второй главе набор зависимостей относительных интенсивностей спектральных линий гелиеподобного иона был использован для определения электронной температуры и плотности рекомбинирующей плазмы, образующейся в экспериментах по моделированию астрофизических потоков плазмы. В этих экспериментах, описанных в третьей главе, тефлоновая мишень облучалась лазерным импульсом наносекундной длительности, сфокусированным в пятно в несколько сотен микрон (плотность потока энергии $\sim 10^{14}$ Вт/см²). Образующаяся в результате облучения рекомбинирующая плазма распространялась от мишени либо свободно, либо под действием внешних факторов таких как однородное магнитное поле или плазменная среда низкой плотности. В главе приведены зависимости электронной температуры и плотности плазменного факела от расстояния до мишени, который были определены при помощи методики, описанной в главе 2. На основе полученных кривых для разных постановок эксперимента продемонстрировано, что при разлете плазмы во внешнем магнитном поле характеризуется большими значениями электронной температуры и плотности, чем в случае свободного распространения. Температура сохраняет значение на уровне 10-15 эВ на расстояниях вплоть до 10 мм от мишени. Данный факт интерпретирован автором как результат коллимации плазмы в узкую струю под действием магнитного поля и подтверждается данными интерферометрической диагностики также приведенными в главе. При разлете плазмы в предварительно созданной плазменной среде также наблюдается повышение электронной температуры и плотности относительно свободного разлета, однако сама динамика плазмы

несколько отличается от разлета в вакууме в связи с тем, что направление разлета вдоль оси системы перестает быть выделенным.

В четвертой главе проведена диагностика стационарной плазмы, образующейся при столкновении плазменных потоков, представляющих собой смесь дейтерия с неоном или азотом. Подобные эксперименты проводятся в АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ с целью создания сверхъяркого протяженного источника мягкого рентгеновского излучения. В начале главы приведено детальное описание установки 2МК-200, которая представляет собой два плазменных ускорителя, разгоняющих плазменные потоки навстречу друг другу до скоростей $2-4 \times 10^7$ см/с. Образующаяся в месте столкновения высокотемпературная плазма является источником рентгеновского излучения в диапазоне энергий фотонов от 50 до 500 эВ. Его спектр представляет собой сумму непрерывного и линейчатого спектров, последний из которых соответствует спектральным линиям H-, He-, Li-подобных ионов азота или неона. Эти линии и были использованы автором для диагностики. В главе приведены рассчитанные в рамках стационарной модели относительные интенсивности наблюдаемых экспериментально линий азота и неона для широкого диапазона электронных температур. Параметры плазмы определялись путем сопоставления экспериментальных и расчётных значений отношений. В результате было получено, что при столкновении потоков азотосодержащей плазмы со скоростями $\sim 10^7$ см/с в области столкновения реализуется температура на уровне 120 эВ, а при столкновении потоков неоносодержащей 140-160 эВ.

В конце диссертации приведено **Заключение**, в котором перечислены основные результаты диссертационной работы: конкретные значения электронной плотности и температуры рекомбинирующей плазмы, образующейся в лабораторно-астрофизическом эксперименте, а также стационарной плазмы, образующейся в экспериментах по столкновению потоков низкотемпературной плазмы.

Изложение материалов диссертации выполнено на высоком уровне, четким и ясным языком, обладает внутренним единством. По каждой главе сформулированы выводы, отражающие их основную суть. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Тем не менее, хотелось бы привести несколько **замечаний**, как общего характера, так и касающихся способа представления полученных результатов.

1. В первой главе довольно подробно рассмотрены принципы, по которым можно сопоставлять реальные астрофизические струи плазмы и потоки лазерной плазмы, приведена конкретная таблица соответствия масштабных параметров, однако нет ни одной ссылки на какой-либо конкретный астрофизический объект, который подобен плазме, образующейся в экспериментах, рассмотренных в третьей главе.

2. Как следует из рис. 3.10 интенсивность линии He_{γ} превышает интенсивность линии He_{β} , на расстоянии более 1 мм от мишени, что, по утверждению автора, свидетельствует об интенсивной рекомбинации в разлетающейся плазменной струе. В то же время результаты расчетов, приведенные на рис. 3.11 в качестве иллюстрации спектров, соответствующих рекомбинационной нестационарности, демонстрируют, что интенсивность линии He_{γ} не превышает интенсивность линии He_{β} .

3. В третьей главе, в частности в первом абзаце на стр.85, говорится о том, что данные полученные при помощи методики, разработанной автором, хорошо согласуются с результатами интерферометрической диагностики. Это утверждение в некотором смысле неверно и требует указания о каком именно соответствии идет речь, в силу того, что используемые для рентгеноспектральной диагностики спектры являются интегрированными по всему времени существования плазмы. Интерферометрическая же диагностика дает результаты для конкретного момента времени.

4. На рис. 3.12, 3.13 и 3.15 приводятся профили электронной температуры и плотности вдоль оси z , при этом не указано значение радиальной координаты, соответствующей этим профилям.

5. В экспериментах, описанных в четвертой главе, явно указано, что сталкивающиеся потоки являются смесью неона или азота с дейтерием. При этом концентрация неона, реализованная в экспериментах, явно указана – 25 %. Для азота же значение этого параметра опущено. В связи с этим также хотелось отметить, что измерение выхода рентгеновского излучения в зависимости от концентрации рабочего газа является интересной экспериментальной задачей, которую также можно рассмотреть в дальнейших исследованиях.

Однако перечисленные выше замечания не снижают достоверности и важности научных результатов полученных в диссертации результатов.

По результатам исследований Рязанцевым С.Н. опубликовано 9 печатных работ в изданиях, входящих в реферативную базу данных Web of Science. Содержание публикаций достаточно полно отражает результаты научных исследований диссертационной работы. Результаты докладывались на 12 российских и международных конференциях.

В целом, диссертация Рязанцева С.Н. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно. Ее результатом является решение важной задачи диагностики нестационарной

плазмы: разработана рентгеноспектральная методика определения электронной температуры и плотности рекомбинирующей и ионизирующейся плазмы, которая применена для диагностики лазерной плазмы, образующейся в лабораторно-астрофизических экспериментах. Кроме того, автором проведена рентгеноспектральная диагностики стационарной плазмы, образующейся при столкновении низкотемпературных плазменных потоков. Задачи и содержание работы соответствуют паспорту специальности 01.04.08 – Физика плазмы. Предложенная в диссертации методика может быть применена для определения плазменных параметров в научных организациях, занимающихся лазерно-плазменными исследованиями, в частности ИПФ РАН, ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ, ИОФ РАН, НИЦ Курчатовский институт – ИТЭФ.

Диссертационная работа Рязанцева С.Н. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Рязанцев Сергей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, (научная специальность – 01.04.21 – Лазерная физика).

АУП, ФБГУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

 Андреев Степан Николаевич

"01" декабря 2017 г.

Подпись Андреева Степана Николаевича заверяю:

Заместитель директора ИОФ РАН

д.ф.-м.н., профессор



 В.Г. Михалевич

"01" декабря 2017 г.

ФБГУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Почтовый адрес: 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Телефон: 8(499) 503-83-27 ,

e-mail: nauka@gpi.ru