

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20.12.2017 протокол № 20

О присуждении Рязанцеву Сергею Николаевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Рентгеноспектральная диагностика рекомбинирующей плазмы для задач лабораторной астрофизики» в виде рукописи по специальности 01.04.08 – Физика плазмы, принята к защите 04.10.2017г., протокол № 14, диссертационным советом Д 002.110.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Рязанцев Сергей Николаевич 1991 года рождения, в 2013 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

С 2014 года обучается в очной аспирантуре физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Диссертация выполнена в Лаборатории № 1.2.5 – диагностики вещества в экстремальном состоянии НИЦ – 1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Работает младшим научным сотрудником Лаборатории № 1.2.5 – диагностики вещества в экстремальном состоянии НИЦ – 1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Пикуз Сергей Алексеевич, заведующий лабораторией 1.2.5 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, НИЦ-1.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, Грум-Гржимайло Алексей Николаевич, ведущий научный сотрудник отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Андреев Степан Николаевич, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук;

доктор физико-математических наук, Терехин Владимир Александрович, главный научный сотрудник Института теоретической и математической физики Федерального государственного унитарного предприятия

Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения" (г. Королев), в своем положительном заключении, составленном заместителем начальника отдела 1114, доктором физико-математических наук Матафоновым А.П. (утвержденном генеральным директором ФГУП ЦНИИмаш, д.т.н. профессором Горшковым О.А.), указала что:

В настоящее время существует определенный интерес к исследованию такой плазмы, связанный с лабораторно-астрофизическими исследованиями плазменных струй, выбрасываемых из звезд на ранних стадиях их эволюции, поэтому развитие методов рентгеноспектральной диагностики плазмы, применимых в случае рекомбинационной нестационарности ее ионизационного состояния, обосновывает актуальность работы Рязанцева С.Н. В диссертации предложен новый метод рентгеноспектральной диагностики рекомбинирующей плазмы, который применялась для интерпретации результатов экспериментов по созданию коллимированных струй лабораторной плазмы при помощи внешних аксиальных магнитных полей.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, так как для экспериментальных измерений использовалось современное высокоточное оборудование, а данные, полученные при помощи предлагаемой автором методики, находятся в хорошем согласии с результатами интерферометрической диагностики. Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Институте прикладной физики РАН, Институте общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Национальном исследовательском

ядерном университете «МИФИ», в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт", в МГУ им. М.В. Ломоносова, в ФГУП ЦНИИмаш и во многих других научных учреждениях.

Соискатель имеет 8 опубликованных статей в реферируемых журналах, включенных в реферативную базу данных Web of Science, более 10 тезисов в сборниках трудов конференций:

Основные работы:

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, I. 11. — e1700982(1)-e1700982(10)
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

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Государственный научный центр российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований госкорпорации «Росатом» (Начальник лаборатории исследования эмиссии плазмы отделения магнитных и оптических исследований, д.ф.-м.н. Гаврилов В.В.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- 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 определить ось абсцисс, а на Рис. 6 показать экспериментальную ошибку.

2. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (заместитель директора Института лазерных и плазменных технологий, профессор, д.ф.-м.н. Кузнецов А.П.) - отзыв положительный, с замечанием:

- Однако на стр. 20 (автореферата), где речь идет о диагностике неона- и азотосодержащей стационарной плазмы, не объяснено почему именно эти линии являются наиболее удобными для диагностики, хотя по спектру неона содержащей плазмы, приведенному на рис. 9(б) видно, что

регистрируется еще ряд линий, интенсивности которых использованы не были.

3. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (д.ф.-м.н., профессор, профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Савельев-Трофимов А.Б.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- используемый в работе термин «нестационарность», на мой взгляд не совсем соответствует реально осуществленным исследованиям, поскольку расчеты и измерения проводятся интегрально по времени. Авторы используют изящный метод решения сложной системы уравнений для кинетики населенностей уровней ионов, однако сравнение с соответствующим стационарным распределением (на основе уравнений Саха) не приводится. Кроме того, в работе плазма считается «вмороженной» в пространство (без гидродинамики), т.е. предполагается неизменность концентрации и температуры в каждой точке плазмы в процессе измерения, что, как минимум, требует обоснования.

- из текста автореферата не ясно, насколько используемая авторами ударно-излучательная модель соответствует астрофизическим условиям в плазме

- в автореферате имеется ряд опечаток, повсеместно используется термин «плотность», хотя подразумевается концентрация электронов

4. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (д.ф.-м.н., заведующий лабораторией моделирования плазменных явлений в экстремальных астрофизических объектах Стародубцев М.В.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- ...однако следует отметить, что в полученном мной печатном экземпляре автореферата все рисунки выполнены в градациях серого, хотя в подписях

фигурирует цвет кривых (например, рис. 5), а также содержится несколько пунктуационных ошибок

5. Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)» (д.ф.-м.н., начальник отдела Научно-теоретического отделения № 1, Лобода П.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- следует отметить, что как для результатов диагностики нестационарной плазмы, которой посвящена большая часть диссертации, так и для плазмы, рассмотренной в 4 главе в рамках модели стационарной кинетики, не приведены данные о погрешностях выбранных методов диагностики.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н. Терехин В.А. является ведущим специалистом ИТМФ РФЯЦ – ВНИИЭФ в области взаимодействия электромагнитного излучения с плазмой, в том числе космической:

1. Laser plasma simulations of the generation processes of Alfvén and collisionless shock waves in space plasma / Prokopov P.A., Zakharov Y.P., Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F. et al. // J. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing, – 2016 – Vol. 769, № 1 – P. 12086.
2. Soldatov A. V., Terexhin V.A. Propagation of an ultrawideband electromagnetic signal in ionospheric plasma // Plasma Phys. Reports – 2016 – Vol. 42, № 10 – P. 970–977.
3. Generation of laser plasma bunches with a high efficiency of energy concentration for laboratory simulation of collisionless shock waves in magnetised cosmic plasma / Zakharov Y.P., Ponomarenko A.G., Tishchenko V.N., Antonov V.M. et al. // Quantum Electron. – 2016 – Vol. 46, № 5 – P. 399–405.

- д.ф.-м.н. Андреев С.Н. является специалистом в области численного моделирования процессов взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом;

1. Andreev, S.N., Gabyshev, D.N., Ereimeicheva, Y.I., Makarov, V.P., Rukhadze, A.A. & Tarakanov, V.P. 2015, "Motion of a charged particle in a plane electromagnetic pulse", *Laser Physics*, vol. 25, no. 6.
2. Andreev, S.N., Ereimeicheva, Y.I. & Tarakanov, V.P. 2013, "Features of femtosecond laser pulse reflection from a sharp boundary of relativistic laser plasma", *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, vol. 40, no. 8, pp. 225-229.
3. Andreev, S.N., Garanin, S.G., Yeremicheva, Y.I., Rukhadze, A.A., Tarakanov, V.P. & Yakutov, B.P. 2012, "Optimisation of neutron yield under ultra-intense laser impact on deuterated polyethylene targets", *Quantum Electronics*, vol. 42, no. 7, pp. 600-604.

Выбор Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ФГУП ЦНИИмаш является ведущей организацией по фундаментальным астрофизическим исследованиям в структуре Государственной корпорации «Роскосмос», в том числе в области лабораторной астрофизики с использованием лазерных импульсов.

1. В.С. Беляев, П.А. Батищев, В.В. Большаков, К.С. Ёлкин, Г.Ф. Карабаджак, Д.В. Ковков, А.П. Матафонов, Г.Г. Райкунов, Р.А. Яхин, С.А. Пикуз, И.Ю. Скобелев, А.Я. Фаенов, В.Е. Фортов, В.П. Крайнов, В.Б. Розанов, Перспективные направления исследований в области лабораторной астрофизики с использованием мощных лазеров, *Ядерная физика*, том 76, вып. 4, сс. 441-461 (2013).

2. В.С. Беляев, Г.Ф. Карабаджак, Д.В. Ковков, Г.Г. Райкунов, А.П. Матафонов, А.Я. Фаенов, С.А. Пикуз мл., И.Ю. Скобелев, Т.А. Пикуз, Д.А. Фокин, В.Е. Фортов, Г.Н. Игнатьев, С.В. Капитанов, П.С. Крапива, К.Е. Коротков, О возможности получения импульсов некогерентного рентгеновского излучения фемтосекундной длительности с помощью лазерной плазмы, Письма в ЖЭТФ, том 97, вып. 12, сс.782-787 (2013).
3. В.С. Беляев, Д.В. Ковков, А.П. Матафонов, Г.Ф. Карабаджак, Г.Г. Райкунов, А.Я. Фаенов, С.А. Пикуз, И.Ю. Скобелев, Т.А. Пикуз, Д.А. Фокин, Г.Н. Игнатьев, С.В. Капитанов, П.С. Крапива, К.Е. Коротков, В.Е. Фортов, Временная структура импульсов рентгеновского излучения пикосекундной лазерной плазмы, Квантовая Электроника, Том 43, № 9, с. 865-870 (2013).

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

- Показано, что для диагностики рекомбинирующей плазмы можно использовать относительные интенсивности переходов $1snp \ ^1P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$ с $n=3-7$ в He-подобных многозарядных ионах (линии He $_{\beta}$, He $_{\gamma}$, He $_{\delta}$, He $_{\epsilon}$, He $_{\zeta}$, соответственно). Для ионов с зарядом ядра $Z_n \sim 10$ область чувствительности отношений интенсивностей к плотности плазмы составляет $10^{15}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ при температурах 10–130 эВ.

- Конкретные расчеты, проведенные для иона F VIII, позволили определить параметры пламенных струй, создаваемых на наносекундной лазерной установке ELFIE (Ecole Polytechnique, Франция) с целью моделирования астрофизических явлений, а именно, продемонстрировано, что при наложении однородного магнитного поля с индукцией 20 Т электронная плотность плазмы, сформированной наносекундным лазерным импульсом, сфокусированным в пятно размером в несколько сотен микрон, остается на уровне 10^{18} см^{-3} на значительном расстоянии от мишени (до 10 - 12 мм), а электронная температура на уровне 10-15 эВ.

- Продемонстрировано, что в месте столкновения 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.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- проведен расчет интенсивностей спектральных линий нестационарной плазмы, содержащей He-подобные ионы фтора F VIII на основе которого сформулирована методика определения электронной температуры и плотности плазмы с рекомбинационным и ионизационным типом нестационарности;
- приведены соотношения, позволяющие обобщить приведенные в диссертации результаты для He-подобного иона фтора на случае произвольного He-подобного иона со спектроскопическим символом Z.
- полученные при помощи авторской методики пространственные профили электронной температуры и плотности позволяют создать комплексное описание разлета лазерной плазмы с астрофизическим подобием;

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- Предложенная методика рентгеноспектральной диагностики плазмы 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.

- Полученные при помощи авторской методики данные экстраполированные при помощи принципов подобия на астрофизические масштабы позволяют верифицировать существующие на данный момент 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, который может быть использован, как для фундаментальных исследований в области ядерной энергетики, так и для создания технологических устройств для упрочнения материалов и деталей вспышками излучения.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИОФ РАН им. А. М. Прохорова, ФГУП ЦНИИмаш, Институте Лазерных и Плазменных технологий НИЯУ МИФИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, в НИЦ "Курчатовский институт", Институте астрономии РАН и во многих других научных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- использованы современные методы и приборы для регистрации рентгеновского излучения плазмы и определения его спектрального состава, показана воспроизводимость результатов исследования;
- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, фактах, общепризнанных законах кинетики плазмы.

Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

- идея диссертационной работы базируется на анализе научной литературы по предметной области исследования, обобщении передового опыта работы других научных групп и лабораторий;

- установлено хорошая корреляция авторских результатов и представлений с результатами других диагностических методов (в частности интерферометрической диагностики);

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования, постановке задачи. 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.

Апробация результатов исследования проводилась на более чем 12 российских и международных конференциях и симпозиумах, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе в большинстве своем подготовлены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 20.12.2017г. диссертационный совет принял решение присудить Рязанцеву С.Н. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 31 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 12 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 24, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор



Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

к.ф.-м.н.



Васильев М.М.



20.12.2017г.