

**Сведения**  
о ведущей организации

Полное наименование организации	Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
Сокращенное наименование	ЦНИИмаш
Организационно-правовая форма	ФГУП
Тип организации	Научная организация
Ведомственная принадлежность	ГК «Роскосмос»
Почтовый адрес	Россия, 141070, Московская область, г.Королёв, ул.Пионерская, д.4
Адрес сайта	<a href="http://www.tsniimash.ru/">http://www.tsniimash.ru/</a>
Адрес электронной почты	corp@tsniimash.ru
Телефон	8 (495) 513-59-51

**СПИСОК**

Опубликованных работ по теме диссертации Рязанцева С.Н. в рецензируемых научных изданиях Ведущей организации Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» за последние 5 лет:

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).
4. Фундаментальные космические исследования. В 2 кн. Кн. 1. Астрофизика / Под науч. ред. Докт. Техн. Наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 452 с. – ISBN 978-5-9221-1549-0.
5. В. С. Беляев, В. П. Крайнов, Б. В. Загребев, А. П. Матафонов, Возможность реализации цепной ядерной реакции термоядерного синтеза на основе реакции  $p+^{11}\text{B}$ , Ядерная физика, 2015, том 78, №7-8, с. 580–590.
6. V S Belyaev, V P Krainov, A P Matafonov and B V Zagreev, The new possibility of the fusion  $p + ^{11}\text{B}$  chain reaction being induced by intense laser pulses, Laser Phys. Lett. 12 (2015) 096001 (5pp).
7. N. N. Demchenko, V. B. Rozanov, V. S. Belyaev, G. F. Karabadzhak, V. P. Danilov, B. V. Zagreyev, A. Yu. Kedrov, V. N. Kulikov and A. P. Matafonov, Effect of prepulses on the generation of fast protons in a flat target under the action of a high-power picosecond



- laser pulse, Journal of Russian Laser Research, Volume 36, Number 5, September, 2015, pp. 408-411.
8. С. А. Пикуз мл., И. Ю. Скобелев, А. Я. Фаенов, Я. С. Лавриненко, В. С. Беляев, В. Ю. Ключников, А. П. Матафонов, А. С. Русецкий, С. Н. Рязанцев, А. В. Бахмутова, Твёрдотельные трековые детекторы в исследованиях лазерной плазмы ТВТ, 2016, 54:3, 453–474.
  9. В.С. Беляев, Б.В. Загребев, А.Ю. Кедров, А.В. Лобанов, А.П. Матафонов и др., Перспективные направления исследований в области ядерной лабораторной астрофизики с использованием мощных лазеров, Ядерная физика, 2016, т. 79, № 5, стр. 438-455 (2016).
  10. V.S. Belyaev, B.V. Zagreev, A.Yu. Kedrov, A.V. Lobanov, A.P. Matafonov et. all., Laboratory modeling of big bang nucleosynthesis using powerful laser facilities, Laser Phys. 27 (2017) 066001 (8pp).

Главный ученый секретарь ФГУП ЦНИИмаш,  
д.т.н.



Ю.Н. Смагин



«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор ФГУП ЦНИИмаш  
д.т.н., профессор  
Горшков О.А.  
«08» 12 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации 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. предложен новый метод рентгеноспектральной диагностики рекомбинирующей плазмы. В целом, интерес к исследованию такой плазмы возник еще в конце прошлого века в рамках задачи 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. Теоретическую основу такого моделирования составляет инвариантность законов, описывающих эволюцию плазмы, относительно определенных групп преобразований. Это позволяет сформулировать так называемые законы 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.

Диссертация состоит из Введения, 4 глав и Заключения.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, описана его научная новизна и практическая значимость, обозначен личный вклад автора, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также публикации автора по теме диссертации.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер. В ней дано описание явления крупномасштабных (размерами до нескольких парсек) астрофизических струй (джетов) плазмы, испускаемых Молодыми



Звездными Объектами. Из общих соображений следует, что процессы, приводящие к формированию таких плазменных потоков, оказывают существенное влияние на эволюцию звезды на ранних этапах, поэтому их изучение является довольно важной фундаментальной задачей. Одним из способов изучения астрофизических джетов является их моделирование в лабораторных условиях при помощи лазерной плазмы. В главе рассмотрены математические принципы, при помощи которых возможно проводить прямые аналогии между струями лабораторной и астрофизической плазмы. Кроме того, приведено описание совокупности экспериментальных работ, в которых при помощи особой конструкции создавалась плазма, отвечающая всем необходимым условиям подобия. При этом главной целью описанных экспериментов было создание плазменной струи с высоким значением отношения длины к ее поперечному размеру.

Во второй главе приведено теоретическое обоснование методики рентгеноспектральной диагностики плазмы с нестационарным ионизационным состоянием. Для широкого диапазона электронных температур и плотностей для случаев рекомбинирующей и ионизирующейся плазмы автором проведены расчеты относительных интенсивностей четырех пар линий гелиеподобного иона фтора F VIII, на основе которых показано, что для диагностики рекомбинирующей плазмы можно использовать относительные интенсивности переходов  $1snr\ ^1P_1-1s^2\ ^1S_0$  с  $n=3-7$  в He-подобных многозарядных ионах (линии He $_{\beta}$ , He $_{\gamma}$ , He $_{\delta}$ , He $_{\epsilon}$ , He $_{\xi}$ , соответственно). Для ионов с зарядом ядра  $Z_n \sim 10$  область чувствительности отношений интенсивностей существует при плотности плазмы в диапазоне  $10^{15}-10^{19}\text{ см}^{-3}$  и при температурах в диапазоне 10–100 эВ. Кроме того, в главе продемонстрированы аналогичные зависимости для водородоподобных многозарядных ионов на примере иона кислорода O VIII.

В третьей главе дано описание экспериментальной установки по созданию вытянутых струй лабораторной плазмы при помощи магнитных полей с высоким значением индукции (20 Тл). Эксперименты были реализованы на базе Лаборатории применения интенсивных лазеров (LULI, Франция). В этих экспериментах мишень из тефлона облучалась наносекундным лазерным импульсом с интенсивностью на уровне  $10^{14}\text{ Вт/см}^2$ . В различных экспериментах образующаяся плазма разлеталась либо свободно, либо в однородном магнитном поле, силовые линии которого были направлены перпендикулярно мишени, либо в плазменной среде, создаваемой предварительным импульсом малой интенсивности (на порядок меньше энергии основного импульса). Рентгеновское излучение плазмы регистрировалось при помощи



фокусирующих спектрометров с пространственным разрешением, обеспечивающих при этом спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda \sim 1000$ . На основе формы спектров автором был сделан вывод о рекомбинационном типе нестационарности плазмы, что позволило определять электронную температуру и плотность плазмы на основе расчетов, проведенных во второй главе. Автором были получены пространственные профили электронной температуры и плотности для всех трех экспериментальных постановок упомянутых выше. На основе этих кривых, а также данных интерферометрической диагностики было проанализировано влияние магнитного поля и окружающей плазменной среды на динамику разлета струй, создаваемой основным импульсом. В присутствии магнитного поля образующаяся плазма формируется в узкую струю, что отражается в том, что светимость плазмы в рентгеновском диапазоне продолжается на значительных расстояниях от мишени (вплоть до 10 мм), а электронная температура, определявшаяся на основе авторской методики, сохраняется на таких удалениях на уровне 10–15 эВ. При свободном разлете уже на расстоянии 3–4 мм от мишени электронная температура падает до значений ниже 10 эВ, а ее светимость в рентгеновском выходит за пределы предлагаемой автором методики. К дополнительному увеличению температуры также приводит влияние плазменной среды, создаваемой малоэнергетичным предварительным импульсом. Таким образом, в главе показано, что предлагаемая методика вполне успешно может применяться для интерпретации результатов реальных экспериментов.

В четвертой главе диссертации описаны результаты рентгеноспектральной диагностики параметров высокотемпературной плазмы, образующейся в месте столкновения низкотемпературных плазменных потоков, содержащих многозарядные ионы неона или азота. Подобные эксперименты проводятся в АО ГНЦ ТРИНИТИ (г. Москва, г. Троицк) для создания протяженного источника мягкого рентгеновского излучения. Плазма в области столкновения является стационарной, что следует из сравнения характерного времени установления стационарных значений населенностей возбужденных уровней для ожидаемых параметров плазмы и экспериментально зарегистрированной длительности ее существования. В связи с этим автором в рамках стационарной модели были рассчитаны относительные интенсивности спектральных линий H-, He-, Li-подобных ионов азота и неона, после чего на основе анализа экспериментальных рентгеновских спектров были определены значения электронной температуры плазмы в области столкновения. В конце главы рассмотрены особенности зависимостей выбранных для диагностики



отношений интенсивностей спектральных линий, ухудшающие точность определения параметров плазмы.

Рентгеноспектральный анализ является мощным диагностическим инструментом современной физики, который позволяет по особенностям излучаемого плазмой спектра определять ее параметры. В большинстве случаев методики рентгеноспектральной диагностики плазмы основываются на предположении о стационарности ее ионизационного состава. Однако использование такого допущения не всегда правомерно. Так, например, нестационарным оказывается ионизационное состояние разлетающихся областей лазерной плазмы. В этом случае плазма является рекомбинирующей и попытка определения ее электронной температуры, например, по соотношению интенсивностей ее резонансных линий и их диэлектронных сателлитов может дать совершенно неверные результаты. При этом в настоящее время существует определенный интерес к исследованию рекомбинирующей плазмы, связанный с лабораторно-астрофизическими исследованиями плазменных струй, выбрасываемых из звезд на ранних стадиях их эволюции, поэтому развитие методов рентгеноспектральной диагностики плазмы, применимых в случаях рекомбинационной нестационарности ее ионизационного состояния, обосновывает актуальность данной работы.

**Научная новизна** работы заключается в разработке новой методики рентгеноспектральной диагностики рекомбинирующей плазмы, предназначенной для исследования широкого класса плазменных объектов с нестационарным ионизационным состоянием. С помощью данной методики впервые проведены расчеты зависимостей относительных интенсивностей спектральных линий многозарядных ионов, находящихся в рекомбинирующей лазерной плазме. Предложенная методика успешно применялась для интерпретации результатов экспериментов по лабораторному моделированию астрофизических плазменных струй.

Научной новизной также обладают результаты экспериментов, проведенных с участием Рязанцева С.Н. по созданию коллимированных струй лабораторной плазмы при помощи внешних аксиальных магнитных полей с высоким значением индукции (20 Тл).

Из содержания работы ясно, что лабораторные исследования лазерной плазмы с астрофизическим подобием активно проводятся в настоящее время в ведущих научных лабораториях России и за рубежом, что обуславливает **практическую значимость** диссертационной работы Рязанцева С.Н. Предложенная методика может быть использована в целом ряде научных организаций, осуществляющих исследования по физике плазмы, например, в



ИПФ РАН, ИОФ РАН, «ЛаПлаз» НИИЯУ МИФИ, РФЯЦ ВНИИЭФ, а так же во ФГУП ЦНИИмаш, например для формирования предложений по созданию научных приборов нового поколения для фундаментальных космических исследований.

По теме диссертации опубликовано 9 работ в реферируемых научных изданиях. Результаты работы также обсуждались на более чем десяти российских и международных конференциях.

**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.

Основные поставленные задачи исследования выполнены.

В целом, диссертация написана грамотным научным языком и хорошо структурирована, однако следует отметить ряд **замечаний**:

1. В целом понятно, как при помощи совокупности экспериментальных данных и расчётных кривых для отношений интенсивностей решать задачу определения параметров плазмы, но в тексте диссертации не лишним бы было привести конкретный пример получения любой точки пространственных профилей электронной температуры и плотности, приведенных в третьей главе.

2. Представление населенностей возбужденных уровней в виде выражения (2.6) только через коэффициенты рекомбинационного и ионизационного заселения за счет электрон-ионных соударений требует обоснования.

3. В главе 3 явно не указано, каким именно из представленных в главе 1 критериев подобия отвечают плазменные струи, полученные в экспериментах, которые описаны в главе.

4. Существует ряд недочетов, связанных с представлением полученных материалов диссертации и затрудняющих ее восприятие. Так, например, на рисунке 2.9, на котором представлена зависимость интенсивностей спектральных линий от электронной плотности не указан ион, для которого они рассчитаны, хотя из контекста следует, что это водородоподобный кислород. На рисунке 4.5, на котором представлены реальные сигналы фотодиодов не указан момент начала отсчета времени измерений.

Указанные замечания не затрагивают основного научного содержания работы и не снижают общей высокой оценки диссертации Рязанцева С.Н.



В диссертационной работе Рязанцева С.Н. решена актуальная задача по разработке рентгеноспектральной диагностике рекомбинирующей плазмы для задач лабораторной астрофизики.

Материал диссертации изложен четко, хорошо проиллюстрирован. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, **выполненную автором самостоятельно**. Она соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013, а ее автор Рязанцев С.Н. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа Рязанцева С.Н. была заслушана на заседании подсекции № 1-1 секции № 1 НТС Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», протокол № 4-11/17 от 23.11.2017.

Полное наименование ведущей организации:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения».

Юридический адрес: ул. Пионерская, д. 4, городской округ Королёв, Московская область, 141070.

Тел: (495) 513-59-51

E-mail: corp@tsniimash.ru

Заместитель начальника отдела 1114

ФГУП ЦНИИмаш,

д.ф.-м.н.

А.П. Матафонов

Заместитель председателя подсекции № 1-1

секции № 1 НТС, ведущий научный

сотрудник отдела 1111 ФГУП ЦНИИмаш,

к.т.н.

Ю.П. Назаров