

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,  
заведующего лабораторией «Моделирования плазменных явлений  
в экстремальных астрофизических объектах» (373),  
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»  
Стародубцева Михаила Викторовича  
на диссертационную работу Мартыненко Артема Сергеевича

«Сверхплотная плазма в условиях изохорического нагрева пикосекундными  
лазерными импульсами релятивистской интенсивности»

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

Диссертация Мартыненко А.С. посвящена экспериментальному обеспечению **условий** изохорического нагрева лазерной плазмы и исследованию её свойств в прямой и непрямой схемах нагрева твердотельных мишеней высококонтрастными пикосекундными лазерными импульсами субпетаваттной мощности.

Диссертация состоит из Введения, 4 глав, списка используемой литературы 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 Мартыненко А.С. по теме диссертации.

В **первой главе** обсуждается возможность использования эмиссионных рентгеновских спектров лазерной плазмы для оценки момента начала плазмообразования и, тем самым, характеристики временного профиля лазерного импульса, что особенно актуально для задач создания состояний вещества со сверхвысокой плотностью энергии. Предложенный метод основан на анализе профиля и относительных интенсивностей диэлектронных сателлитов и линии  $Ly\alpha$  H-подобного иона. В качестве апробации метода демонстрируется его применение для анализа спектров с заведомо высоким и заведомо низким лазерным контрастом.

**Вторая глава** также посвящена развитию рентгеноспектральных методов, но здесь рассматривается подход, позволяющий определить начальные параметры свободно разлетающейся лазерной плазмы с учётом её остывания, используя для этого интегральные по времени эмиссионные рентгеновские спектры плазмы. Стоит сразу отметить, что разработанные в первых двух главах подходы актуальны и могут быть применены в экспериментах в научных организациях, занимающихся лазерно-плазменными исследованиями, как российских, так и зарубежных.

**В третьей главе** рассматриваются вопросы создания и изучения свойств сверхплотной плазмы при прямом воздействии лазерного излучения на твердотельную мишень. Демонстрируется эффективность использования сложно структурированных мишеней для этого. Показано, в частности, что использование мишеней, покрытых пластиком толщиной порядка микрометра, может обеспечить весьма высокие значения плотности плазмы, вплоть до околотвердотельных, представляющих наибольший интерес в экспериментах с высокой плотностью энергии. Было экспериментально получено плазменное состояние с плотностью энергии порядка  $5 \times 10^7$  Дж/см<sup>3</sup>. Использование такого экспериментального подхода позволило пронаблюдать проявления различных эффектов плотности, в т.ч. проявляющихся в атомной структуре многозарядных ионов плазмы, в первую очередь, эффекта понижения потенциала ионизации. Была получена экспериментальная зависимость положения фоторекомбинационного континуума от плотности, и проведена валидация существующих моделей понижения потенциала ионизации. Продемонстрирована эффективность использования излучения лазерной плазмы в качестве источника рентгеновского излучения для абсорбционной спектральной диагностики в исследованиях плотного нагретого вещества.

**В четвертой главе** рассматривается способ изохорического прогрева вещества, альтернативный прямому греющему действию лазерного импульса и основанный на нагреве вещества потоком лазерно-ускоренных электронов. В качестве мишени использовалась тонкая проводящая проволока, а процесс ее нагрева исследовался одновременно эмиссионной рентгеновской и теневой радиографической диагностикой. Помимо покадровой регистрации гидродинамического процесса разлёта мишени в диапазоне времён 0.1–8 нс и демонстрации изохоричности нагрева вещества потоком горячих электронов, было изучено влияние лазерных параметров на профили нагрева вещества.

В конце диссертации приведено **Заключение**, в котором перечислены основные результаты диссертационной работы.



**Актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений. Развитие экспериментальной техники в последние десятилетия сделало возможным обеспечение условий изохорического нагрева мишеней и формирование в лабораторных условиях экстремальных состояний вещества, а именно плотного нагретого и плотного горячего веществ. Экспериментальное исследование свойств вещества, находящегося в таких состояниях, чрезвычайно важно для целого ряда фундаментальных и прикладных задач, таких как описание состояний разнообразных астрофизических объектов (например, внутренних слоёв некоторых звезд и газовых гигантов), развитие инерциального термоядерного синтеза и пр. Вопросы получения этих экстремальных состояний вещества путем воздействия лазерных импульсов релятивистской интенсивности и пикосекундной длительности на различные мишени и исследования свойств получающегося вещества как раз и является предметом исследования диссертационной работы. Помимо этого, Мартыненко А.С. в своей работе развивает методологию эмиссионной рентгеновской спектроскопии лазерной плазмы, в частности, приводит способ оценки параметров плазмы в момент приход основного лазерного импульса по интегральным по времени спектрам, что важно практически для любого эксперимента с применением этой диагностики.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Автор корректно использует известные научные методы для обработки и обоснования полученных результатов и формирования выводов. В работе изучены и проанализированы известные достижения и теоретические положения других авторов по методам рентгеноспектральной диагностики плотной лазерной плазмы и трактовке полученных экспериментальных результатов. Список использованной литературы содержит 197 наименований, в том числе большое число свежих научных публикаций. Выводы и результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны; они опираются на существующую теоретико-методологическую и научно-практическую базу, а также на сравнительный анализ результатов эксперимента и соответствующего моделирования.

**Новизна и достоверность диссертационной работы** определяется большим объемом качественно проведенных исследований, направленных на обеспечение условий изохорического нагрева как при прямом прогреве твердотельных мишеней лазерным излучением, так и за счёт вторичных процессов и развитием методов рентгеноспектральной диагностики получающегося вещества. В работе представлен метод получения условий



нагрева мишени, близких к изохорическому, и продемонстрировано достижение плотностей плазмы, близких к твердотельным значениям. Благодаря этому получены новые экспериментальные данные о положении границы фоторекомбинационного континуума, что позволило подробно изучить проявление эффекта понижения потенциала ионизации на эмиссионных рентгеновских спектрах плазмы и, тем самым, верифицировать существующие теоретические модели, описывающие изменения атомной структуры веществ при высоких плотностях и температурах. Продемонстрирована возможность оптимизации источников жёсткого рентгеновского излучения на основе твердотельных мишеней для абсорбционной спектральной диагностики плотной горячей плазмы.

По результатам исследований Мартыненко А.С. было опубликовано 13 печатных работ, 9 из которых входят в реферативные базы данных Web of Science и Scopus. Содержание публикаций достаточно полно отражает результаты научных исследований диссертационной работы. Результаты докладывались на 12 всероссийских и международных конференциях.

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

1. В работе приводятся результаты моделирования, выполненного с помощью радиационно-столкновительных программных пакетов PrismSPECT, FLYCHIK и SCFLY, однако физические модели, заложенные в код, описаны только в общих чертах. В частности, не хватает конкретики по тому, учитывался ли в расчетной модели эффект Штарка и каким образом. Кроме того, в работе не приводится оценка точности восстановления параметров плазмы по эмиссионным рентгеновским спектрам.
2. Модель, описывающая прямое воздействие лазерного излучения на твердотельные мишени, предполагает, что нагрев мишени происходит локально во времени и пространстве (т.е. в течение лазерного импульса и в пределах фокального пятна). Однако, возникающая в ходе лазерного воздействия горячая электронная компонента и создаваемое ей рентгеновское излучение, может нагревать мишень на больших размерах и в течение большего времени. Как это влияет на модель и на восстановление параметров плазмы?

3. Одним из важнейших результатов, представленных в Главе 3 диссертации, является получение плазмы с околотвердотельной концентрацией при использовании структурированной мишени с пластиковыми обкладками, нанесенными на кремниевую фольгу. В диссертации, однако, практически не приводятся объяснения режимов взаимодействия такой мишени с лазерным предимпульсом (пьедесталом). Было бы полезно привести такие объяснения и сформулировать требования на предимпульс.
4. Обозначения на некоторых рисунках приводятся на английском. Кроме того, в работе встречаются опечатки. Ни то, ни другое, впрочем, не затрудняет восприятие диссертации.

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

В целом, хотелось бы отметить, что спектроскопические методы исследования вещества являются одним из мощнейших инструментов физики плазмы. Их развитие неотрывно следует за появлением новых объектов исследования, доступных для лабораторного излучения. Диссертационная работа Мартыненко А.С., посвященная разработке **новых** подходов к рентгеноспектральной диагностике параметров плотной лазерной плазмы, заметно развивает это важное и перспективное направление.


Диссертация Мартыненко А.С. является законченной научно-исследовательской работой, результаты которой могут быть **применены** в научных организациях, занимающихся лазерно-плазменными исследованиями, в частности ИПФ РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, ИОФ РАН, НИЯУ МИФИ, НИЦ КИ – ИТЭФ и др. Задачи и содержание работы соответствуют паспорту специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Работа базируется на большом числе рентгеноспектральных данных и их подробном анализе. В ней приведены наглядные примеры и расчеты. Она доходчиво написана и аккуратно оформлена. Выводы диссертационной работы обоснованы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.



Диссертация полностью соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., ред. 01.10.2018 г., а ее автор Мартыненко Артем Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Официальный оппонент, заведующий лабораторией «Моделирования плазменных явлений в экстремальных астрофизических объектах» (373), Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН); 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46; тел. +7 (903) 043-82-75, ipfran.ru, mstar@ipfran.ru; доктор физико-математических наук (научная специальность – 01.04.08 – «Физика плазмы») Стародубцев Михаил Викторович.

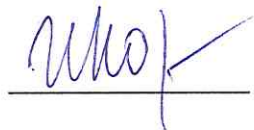
 Стародубцев М.В.

"13" мая 2021 г.

Подпись Стародубцева М.В. заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН,  
к.ф.-м.н.



 Корюкин И.В.

"13" мая 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

Телефон: +7 (831) 436-41-87,

e-mail: alla@ipfran.ru