

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Гожева Дениса Алексеевича

«Генерация высокоэнергетичных заряженных частиц в микро-структурированных мишенях, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Актуальность темы диссертационного исследования. Благодаря прогрессу в лазерных технологиях, нанотехнологиях, в методах создания новых материалов стало возможным экспериментальное исследование взаимодействия сверхмощного лазерного излучения со сложными лазерными мишенями, в том числе содержащими микро- и наноструктуры. Такие микро- и наноструктурированные мишени позволяют повысить эффективность поглощения лазерной энергии, в том числе коэффициент конверсии в высокоэнергетичную фракцию частиц. Меняя параметры мишеней можно управлять параметрами спектра частиц, образующимися в результате взаимодействия. Данное обстоятельство вызывает большой интерес в связи с разработкой компактных источников частиц высокой энергии и жесткого ЭМ излучения высокой интенсивности. Таким образом, диссертация Гожева Д.А. **безусловно является актуальной.** В работе исследуются взаимодействия мощных лазерных импульсов с кластерными и «микропроволочными» мишенями. Представлены результаты оптимизации ускорения дейтронов и результаты расчетов генерации термоядерных нейтронов из кластерной плазмы.

Общая характеристика диссертации. Материал диссертация представлен в четырех главах, содержит введение, заключение и список использованных источников, включающий 145 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, научная новизна и практическая значимость исследования, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава носит вводный характер. В ней представлена информация о различных моделях и режимах поглощения мощного лазерного излучения в структурированной плазме. Рассматриваются некоторые механизмы нагрева электронов лазерным излучением, и в частности, стохастический нагрев. Вторая часть главы посвящена ускорению ионов, где основное внимание уделено ускорению в поле разделения зарядов и кулоновскому взрыву. Последний механизм как раз характерен для кластерной плазмы. Также в этой главе

обсуждаются последние теоретические и экспериментальные результаты исследований взаимодействия мощного лазерного излучения со структурированными мишенями.

Вторая глава посвящена исследованию электронного нагрева при взаимодействии сверхкороткого лазерного импульса с газом атомных кластеров. В главе представлены оценки для количества горячих электронов, образующихся в результате взаимодействия, их характерной энергии, а также длины, на которой происходит истощение лазерного импульса. Также представлены результаты PIC моделирования взаимодействия сверхкороткого лазерного импульса с кластерной средой. Дается обоснование плоско-волнового приближения, используемого при моделировании. Значения параметров горячих электронов, рассчитанные численно, сравниваются с предсказаниями, следующими из теоретических оценок. С помощью численного моделирования показывается, что стохастический нагрев является основным механизмом генерации горячих электронов.

В **третьей главе** приведены результаты оптимизации нагрева дейтронов и генерации лазерных термоядерных нейтронов из кластерной плазмы. Для проведения полномасштабного PIC моделирования использовалось «зональное» приближение, позволившее ограничиться относительно небольшими вычислительными ресурсами. Это приближение проверялось с помощью полного двухмерного PIC моделирования. В результате численного моделирования найдены спектры горячих электронов и дейтронов. Показано, что в зависимости от параметров кластерной плазмы реализуются различные механизмы нагрева дейтронов. Код GEANT4 на основе метода Монте-Карло использовался для оптимизации выхода нейтронов. Продемонстрировано, что выход нейтронов растет с ростом лазерной интенсивности при заданной энергии лазерного импульса.

В **четвертой главе** исследуется взаимодействие мощного лазерного излучения с «микропроволочной» и «микрослоистой» мишенями. Построена модель стохастического нагрева электронов для такого типа мишеней. Найдены оптимальные параметры мишеней, обеспечивающие максимальную температуру горячих электронов. Исследован случай наклонного падения лазерного излучения на мишень.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты и выводы.

Научная новизна положений и результатов. Новизна научных результатов отражена в четырех пунктах, отражающих обнаруженные особенности взаимодействия мощного лазерного излучения со структурированными

мишенями. В диссертации Гожева Д.А. предложен метод, позволяющий упростить численное моделирование лазерно-кластерного взаимодействия; выявлены особенности спектра горячих электронов, возникающих в кластерной плазме по действием лазерного излучения; найдена зависимость выхода нейтронов от параметров лазерного излучения и кластерной среды; найдены оптимальные параметры лазерной «микропроволочной» мишени для генерации быстрых электронов.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные в диссертации методы можно использовать для полномасштабного численного моделирования взаимодействия лазерного излучения с веществом, в том числе для планирования экспериментов на разрабатываемой суб-экзаваттной установке XCELS. Полученные результаты также могут быть использованы для создания ярких лазерно-плазменных источников рентгеновского излучения и нейтронов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечена использованием проверенных кодов, сравнением с аналитическими оценками и известными экспериментальными данными.

К диссертационной работе можно сформулировать следующие **замечания и вопросы**:

1. Вызывает сомнения применимость соотношения (2.5) для анализов процессов в кластерной плазме. Это выражение выведено в [107] для оценки длины поглощения лазерной энергии в однородной плазме. Механизмы поглощения лазерной энергии в однородной и кластерной плазме сильно отличаются. В случае однородной плазмы это, в основном, генерация плазменных колебаний и волн, а в случае кластерной плазмы (сильно локально неоднородной) – стохастический нагрев и возбуждение колебаний электронов около ионного остова кластера.

2. В диссертации используется «зонное» приближение для упрощения численного моделирования взаимодействия лазерного импульса с газом атомных кластеров. В рамках этого приближения процессы, происходящие в этих зонах, рассматриваются независимо и пренебрегается взаимодействием между зонами, в частности, энергообменом между зонами, осуществляемым частицами и ЭМ полями. Каково условие применимости такого приближения?

3. Спектры дейтронов в главе 3, приведены в рисунках без указания момента времени, когда они получены.

4. Спектры дейтронов, полученные в разделе 3.2, использовались в качестве входных данных для расчета выхода нейтронов. Однако, неочевидно, что эти спектры дальше не будут меняться под действием электростатических полей, существующих в кластерной плазме. Хотелось бы увидеть обсуждение вопроса в какой момент времени следует использовать спектры дейтронов, найденные в PIC моделировании, в качестве входных данных для расчета выхода нейтронов.

5. При построение стохастической модели нагрева электронов в «микропроволочных» мишенях не учитывался разлет отдельных «микровололок». В случае длительности лазерного импульса 60 фс, поперечный размер «микровололок» может увеличиться значительно. Насколько важен учет этого эффекта?

Перечисленные замечания и вопросы не снижают общую высокую оценку работы и частично носят рекомендательный характер для дальнейшего развития тематики исследования.

Полученные в ходе работы над диссертацией **результаты прошли необходимую апробацию**, были представлены на многочисленных всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 8 статьях в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и индексируемых международными базами Scopus и Web of Science. Результаты диссертации могут быть использованы в таких научных центрах как ИОФ РАН, ФТИ РАН, ОИВТ РАН, ИПФ РАН, МГУ, МИФИ, НГУ и других.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации, адекватно отражает полученные в работе результаты. Согласно целям и задачам диссертационной работы, используемым методам исследования и полученным результатам, тема диссертации соответствует специальности 1.3.19. — Лазерная физика.

Заключение по работе. Диссертационная работа Д.А. Гожева «Генерация высокоэнергетичных заряженных частиц в микро-структурированных мишенях, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами» является законченной научно-квалификационной работой. По актуальности решаемых задач, новизне и масштабу проведенных исследований, совокупности полученных результатов, их научной и практической значимости представленная диссертационная работа соответствует всем требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Гожев Денис Алексеевич, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. — Лазерная физика.

Согласен на обработку моих персональных данных

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.04.08 – Физика плазмы),
член-корреспондент РАН,
заведующий отделом сверхбыстрых процессов
отделения нелинейной динамики
и оптики Института прикладной физики РАН

Костюков Игорь Юрьевич

21 августа 2025 г.

Адрес организации:

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН

Тел. +7(831)4164831, e-mail: kost@ipfran.ru

Подпись Костюкова И.Ю. заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.

Должность и место работы лица, заверяющего сведения
МП

Подпись

Корюкин И.В.
ФИО

Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН Костюкова И.Ю. по тематике диссертации Д.А. Гожева "Генерация высокоэнергетичных заряженных частиц в микро-структурированных мишенях, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами" за последние 5 лет

1. Golovanov A., Kostyukov I.Yu., Pukhov A., Malka V. Energy-conserving theory of the blowout regime of plasma wakefield //Physical review letters. – 2023. – Т. 130. – №. 10. – С. 105001.
2. Samsonov A. S., Kostyukov I. Y. Acceleration of ions by the force of radiation pressure during the interaction of an extremely intense pulse of circularly polarized laser radiation with a solid target //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Т. 50. – №. Suppl 7. – С. S749-S754.
3. Artemenko I. I., Kostyukov I. Y. Continuous-radiative-loss model for electron-spin dynamics in the radiation-dominated regime //Physical Review A. – 2023. – Т. 108. – №. 5. – С. 052206.
4. Serebryakov D. A., Kostyukov I. Y. Formation of a Strong Quasi-Static Electric Field under Irradiation of a Target with a Spherical Microcavity by Intense Laser Pulses //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Т. 50. – №. Suppl 8. – С. S899-S907.
5. Serebryakov M.A., Samsonov A.S., Nerush E.N., Kostyukov I.Yu. Abnormal absorption of extremely intense laser pulses in relativistically underdense plasmas //Physics of Plasmas. – 2023. – Т. 30. – С. 113303.
6. Golovanov A. A., Kostyukov I. Y. Generation of IR radiation in the interaction of an ultrashort laser pulse with a gas jet //Quantum Electronics. – 2021. – Т. 51. – №. 9. – С. 850.
7. Samsonov A.S., Nerush E.N., Kostyukov I.Yu., Filipovic M., Baumann C., Pukhov A. Beamstrahlung-enhanced disruption in beam–beam interaction //New Journal of Physics. – 2021. – Т. 23. – №. 10. – С. 103040.
8. Samsonov A. S., Kostyukov I. Y., Nerush E. N. Hydrodynamical model of QED cascade expansion in an extremely strong laser pulse //Matter and Radiation at Extremes. – 2021. – Т. 6. – С. 034401.
9. Perevalov S.E., Burdonov K.F., Kotov A.V., Romanovskiy D.S., Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Golovanov A.A., Ginzburg V.N., Kochetkov A.A., Korobeinikova A.P., Kuz'Min A.A., Shaikin I.A., Shaykin A.A., Yakovlev I.V., Khazanov E.A., Kostyukov I.Y. Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 62. – С. 094004.