

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
Общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



/ Гарнов С.В./

« 28 » 11 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Серебрякова Дмитрия Андреевича
**«Динамика электронных структур и генерация фотонов высоких энергий при
взаимодействии интенсивного лазерного излучения с закритической плазмой»**,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.08 — физика плазмы

Диссертационная работа Д. А. Серебрякова «Динамика электронных структур и генерация фотонов высоких энергий при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с закритической плазмой» посвящена теоретическому исследованию и численному моделированию взаимодействия лазерных импульсов релятивистской интенсивности с мишенями твердотельной плотности. Целью работы было изучение динамики электронной плазмы и излучения ею высокоэнергетических фотонов при различных конфигурациях взаимодействия.

Актуальность диссертационной работы. Тематика диссертационной работы относится к исключительно актуальному в настоящее время направлению, известному в современной литературе как «физика лазерной плазмы». Это направление охватывает широкий круг физических эффектов и сценариев взаимодействия; при этом наиболее интенсивное развитие получают в последнее время исследования явлений, возникающих в лазерных полях высокой и сверхвысокой интенсивности. Количественно пороговые значения таких интенсивностей определяются, во-первых, достижением электронами релятивистских энергий, а во-вторых, сильным обратным воздействием испускаемого плазмой излучения

на ее динамику. Для лазерного излучения с длиной волны около одного мкм, эти пороговые значения составляют, по порядку величины, 10^{18} Вт/см² и 10^{23} Вт/см² соответственно. Первое из них было достигнуто на лазерных установках около 30 лет назад, и в настоящее время эксперименты с электромагнитными полями интенсивностью 10^{19} – 10^{21} Вт/см², в которых электроны достигают ультррелятивистских энергий, являются достаточно рутинными, а сама область релятивистской лазерной плазмы – хорошо разработанной как в теории, так и на эксперименте, хотя многие важные вопросы остаются все еще неисследованными или дискуссионными. Рубеж интенсивностей 10^{23} Вт/см² будет с большой вероятностью преодолен в ближайшие годы на новых лазерных источниках мультитераваттного уровня. В настоящее время завершается ввод в эксплуатацию нескольких таких установок, включая SULF (Китай), APRI (Южная Корея), ELI (Чехия, Венгрия, Румыния) и Apollon (Франция). Переход к лазерно-плазменным экспериментам при интенсивностях 10^{23} Вт/см² позволит исследовать новый, до настоящего времени практически недоступный режим взаимодействия лазерного излучения с веществом, отличительной особенностью которого является преобладающая роль силы радиационного трения (radiation-dominated regime).

Поставленные в диссертационной работе задачи посвящены в основном исследованию взаимодействия лазерных импульсов интенсивностью 10^{21} – 10^{23} Вт/см² с плазменными мишенями высокой, твердотельной, плотности и направлены, в частности, на поиск параметров и конфигураций излучения и мишени, позволяющих добиться более эффективного ускорения электронов и увеличения интенсивности рентгеновского излучения плазмы. На основании сказанного можно сделать вывод о высокой степени актуальности темы диссертационной работы.

Структура диссертационной работы. Диссертация Д.А. Серебрякова состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 156 наименований. Полный объем текста составляет 158 страниц, включая 47 рисунков и 1 таблицу.

Во **Введении** приведено краткое описание современного состояния области исследований, дан обзор литературы, обоснована актуальность темы диссертации и сформулирована цель работы, поставлены задачи, изложена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изложению модели «релятивистской электронной пружины», описывающей коллективную динамику приповерхностных электронов при нормальном падении интенсивного лазерного импульса на плоский слой мишени. Новизна рассматриваемой модели заключается в учете силы реакции излучения, которая становится существенной при интенсивностях электромагнитного поля порядка 10^{22} – 10^{23} Вт/см². Сравнение с результатами трехмерного численного моделирования демонстрирует, что поведение приграничных электронов лишь приближенно может описываться моделью коллективной динамики, поскольку на каждом полупериоде лазерного поля часть электронов покидает приповерхностную область и распространяется вглубь плазмы, возникающей при ионизации мишени. С помощью численного моделирования исследуется влияние динамики ионов на эффективность поглощения лазерного излучения плазмой. Исследована зависимость эффективности поглощения энергии лазерного поля от его интенсивности и концентрации плазмы.

Вторая глава посвящена исследованию эффекта генерации рентгеновского излучения с поверхности твердотельной мишени, облучаемой лазерным импульсом с интенсивностью 10^{22} – 10^{23} Вт/см². Разработанная в предыдущей главе модель «релятивистской электронной пружины» применяется здесь для описания генерации излучения высоких частот в классическом режиме. Диаграммы направленности для жестких фотонов вычислены в классическом пределе и сопоставлены с диаграммами, полученными при помощи трехмерного численного PIC-моделирования, в котором излучение фотонов описывается при помощи формул квантовой электродинамики. Показано, что положения максимумов диаграммы направленности в целом хорошо описываются моделью, а их форма оказывается в численном расчете несколько размытой относительно модели из-за наличия разброса направлений скорости приповерхностных электронов. Продемонстрировано увеличение эффективности генерации высокоэнергетических фотонов при наклонном падении лазерного импульса на мишень и определены оптимальные значения концентрации плазмы и угла падения лазерного импульса. Исследовано влияние пре-плазмы с линейным градиентом концентрации на эффективность генерации излучения и найден пространственный масштаб градиента, при котором эффективность достигает максимума.

В **третьей главе** более подробно рассматривается режим скользящего падения лазерного импульса на плоскую мишень. Показано, что в приближении идеального отражения лазерного импульса от мишени вблизи поверхности может формироваться структура

электромагнитного поля, способная ускорять электроны вдоль поверхности на протяжении десятков периодов поля. Такой режим ускорения в определенной степени схож с вакуумным ускорением электронов в поле двух скрещенных лазерных импульсов. Показано также, что ускорение электронов в описанной структуре поля является устойчивым в поперечном направлении для широкого диапазона начальных положений электронов, а при уменьшении угла между плоскостью поверхности мишени и направлением распространения лазерного импульса максимальная энергия электронов увеличивается. Результаты моделирования траекторий тестовых частиц в заданном поле подтверждают эти качественные выводы. Расчеты, выполненные с использованием трехмерного PIC кода показывают, что при скользящем падении лазерного импульса на мишень электроны могут захватываться в приповерхностную структуру поля непосредственно с поверхности или из слоя пре-плазмы, а нелинейные эффекты, включая генерацию высоких гармоник лазерного излучения на поверхности, не приводят к уменьшению эффективности ускорения электронов с ростом интенсивности лазерной волны. При помощи трехмерного численного моделирования найдена эффективность генерации высокочастотного излучения в таком режиме взаимодействия. Показано, что при уменьшении угла падения лазерного импульса эффективность генерации рентгеновских фотонов и степень коллимации фотонного пучка растут. Эти свойства излучения представляют очевидный интерес для практических приложений.

В четвертой главе исследовано влияние периодических микроструктур на поверхности мишени на ускорение электронов и генерацию жестких фотонов. С помощью одномерной модели в ультррелятивистском приближении показано, что электроны испытывают захват структурой электромагнитного поля, что теоретически может приводить к их неограниченному ускорению. В рамках аналитической модели и с помощью численного интегрирования уравнений движения показано, что область фазового пространства начальных условий, для которых происходит «бесконечное» ускорение, расширяется при увеличении начального импульса электронов. Результаты трехмерных PIC-расчетов показывают, что электроны могут эффективно ускоряться по рассмотренному механизму до энергий в 14 МэВ, набираемых за несколько периодов лазерного поля при относительно невысокой интенсивности 10^{20} Вт/см². Обсуждается возможность экспериментального наблюдения данного эффекта. Также исследовано влияние поверхностных микроструктур на эффективность генерации высокочастотного излучения при облучении их лазерным импульсом; численно продемонстрировано увеличение эффективности генерации приблизительно на два порядка в случае

микроструктурированной мишени по сравнению со случаем плоской мишени. Определены ширина и высота элементов микроструктуры, а также ее период, оптимизирующие выход излучения.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, наиболее важными из которых являются следующие:

1. Развита аналитическая модель, описывающая движение приповерхностного слоя электронов при взаимодействии лазерного излучения релятивистской интенсивности с плоской мишенью сверхкритической плотности с учетом силы радиационного трения.
2. Найдены значения концентрации плазмы и угла падения лазерного импульса, максимизирующие выход высокочастотного излучения.
3. Исследовано приповерхностное ускорение электронов лазерным излучением в режиме скользящего падения и развита модель этого эффекта. Определены области устойчивости ускорения в таком режиме. Найдены параметры пре-плазменного слоя, оптимизирующие характеристики ускоренного электронного сгустка.
4. Показано, что использование мишеней, поверхность которых модулирована периодическими структурами субмикронного размера приводит к увеличению выхода рентгеновского излучения примерно на порядок по сравнению со случаем идеально плоской мишени. Найдены параметры микроструктур, позволяющие достичь максимальной эффективности генерации излучения высоких частот.

При изучении диссертационной работы возникли следующие **замечания**:

1. В модели, описывающей динамику электронного слоя на границе плазмы под действием интенсивного линейно поляризованного лазерного излучения, считается, что электронная плотность имеет профиль ступеньки. Известно, что такое предположение неплохо обосновано для случая циркулярной поляризации, когда магнитная компонента силы Лоренца остается практически постоянной. В линейно поляризованном поле переменность этой компоненты будет вызывать движение электрона по 8-образной траектории (как и показано на Рис.1.2) с продольной амплитудой, величина которой может превосходить толщину электронного слоя. Насколько обоснованным является в этом случае ступенчатое приближение для распределения электронной плотности?
2. В разделе 1.2, посвященном анализу высокочастотного излучения приповерхностных электронов, приводятся результаты сравнения рассчитанной численно эффективности конверсии лазерного излучения в рентгеновское с

предсказаниями аналитической модели. Видно, что аналитическая модель завышает значение эффективности в 4-6 раз; этот факт обсуждается в тексте диссертации. Расхождение объясняется резкой зависимостью (четвертая степень) интенсивности излучения от гамма-фактора, который в численном моделировании может оказаться в 1.5-2 раза меньше модельного. Между тем, само утверждение о четвертой степени зависимости далеко не очевидно, если учесть возможность продольного движения электронов, которое приводит к появлению в выражении для интенсивности излучения дополнительного фактора $(1-v_x)^2$, где v_x есть скорость дрейфа электрона вдоль направления распространения волны. В случае релятивистского попутного движения этот фактор может приводить к существенному подавлению интенсивности излучения.

3. В работе встречаются неаккуратные формулировки. Например, на стр.27 утверждается что «ионы имеют на 2-3 порядка меньшее отношение заряда к массе, чем электроны». Даже для протонов это отношение почти в 2000 раз меньше электронного. На стр. 45 указано: «...поскольку механизм излучения ... является синхротронным, излучение с каждого участка траектории направлено вперед по касательной». Это свойство не имеет отношения конкретно к синхротронному излучению, а присуще вообще излучению всякого быстро движущегося заряда. Кроме того, в целом вызывает сомнение использование термина «синхротронное излучение» для случая, когда электрон движется в поле линейно поляризованной волны. Наконец отметим, что текст работы содержит опечатки и ненужные повторы, приводящие к бесполезному увеличению объема.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки работы и значимости полученных результатов. Диссертационная работа Д.А. Серебрякова выполнена на высоком научном уровне и вносит значительный вклад в развитие теории и численного моделирования эффектов взаимодействия плотной плазмы с лазерным излучением сверхвысокой интенсивности.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы при планировании экспериментов на строящихся в настоящее время лазерных установках мультиметтаваттной мощности, а также при анализе и интерпретации будущих экспериментальных результатов. Результаты работы могут найти применение в расчетно-теоретических исследованиях широкого круга специалистов, занимающихся физикой ультрарелятивистской лазерной плазмы в Институте прикладной физики РАН, Физическом институте РАН им. П.Н. Лебедева, Институте общей физики РАН им. А.М.

Прохорова, Объединенном институте физики высоких температур РАН, Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ и других научно-исследовательских и образовательных организациях.

Представленные в диссертационной работе результаты опубликованы в виде 6 статей в российских и зарубежных научных журналах из перечня ВАК, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus и докладывались и обсуждались более чем на 10 международных и российских конференциях.

Диссертационная работа Д. А. Серебрякова представляет самостоятельное и целостное исследование, выполненное на актуальную тему и на высоком профессиональном уровне. Автореферат полно отражает содержание диссертации. Работа отвечает требованиям к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Д. А. Серебряков заслуживает, за теоретические и расчетные исследования динамики и излучения плотной ультрарелятивистской плазмы, взаимодействующей с лазерными импульсами высокой интенсивности, присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Диссертационная работа была заслушана на семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук. Отзыв составлен ведущим научным сотрудником, доктором физико-математических наук, С.В. Попруженко, заслушан и одобрен на заседании ученого совета теоретического отдела ИОФ РАН, протокол № 8 от 27 ноября 2019 г.

В.н.с., д.ф.-м.н.

С.В. Попруженко

Председатель ученого
совета теоретического
отдела, д.ф.-м.н., проф.

Н.Г. Гусейн-заде

Ученый секретарь, д.ф.-м.н.

В.В. Стрелков