

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи

ЖИДКОВ Алексей Геннадьевич

**ИОНИЗАЦИОННО-РАДИАЦИОННАЯ КИНЕТИКА
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ**

Специальность 1.3.9 - Физика плазмы



АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Официальные оппоненты:

Веселовский Игорь Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Козлов Андрей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, ФГУ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Лисица Валерий Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс термоядерных исследований и плазменных технологий.

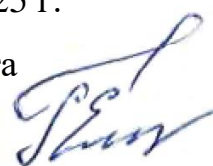
Матвеев Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, с.н.с, главный научный сотрудник, ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, научно-теоретическое отделение.

Защита состоится «12» ноября 2025 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан " __ " _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



Петрова Е.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Релятивистская лазерная плазма является

сравнительно новым объектом исследований, который обязан своим появлением развитию и совершенствованию мощных фемто- и пикосекундных лазеров [1]. За последние декады мощность лазеров непрерывно росла от нескольких тераватт до сверх петтоваттного уровня. Тенденция роста мощности лазеров остается постоянной, и в настоящее время [2-5]. Плазма при этом остается основным объектом взаимодействия такого уровня мощности лазерных импульсов с веществом. Сформированная при этом плазма с температурой в много миллиардов градусов является релятивистской и существенно отличается от традиционной плазмы, в первую очередь появлением в ней значительно числа как классических, так и квантовых процессов, связанных со сверхсильными электромагнитными полями и характерных только для такой плазмы. Ионизационная и радиационная кинетика релятивистской лазерной плазмы представляет поэтому особый интерес. Проявление таких новых процессов как оптическая ионизация и ионизация плазменным полем, ускорение сверхсильными полями электронов и ионов, мощное излучение свободными электронами и многое другое, их сложная взаимосвязь и запутанность требует развитие как аналитических, так и численных методов, позволяющих не только выявить основные физические закономерности процессов, протекающих в релятивистской лазерной плазме, но и подготовить всестороннюю базу для связи теоретической основы с экспериментальными и прикладными исследованиями. Сложность разработки такой основы состоит в сильной запутанности различных процессов как формирования самой плазмы, так ее развития и релаксации. Дополнительные сложности в исследовании релятивистской лазерной плазмы вносит ее разделение на оптически плотную плазму, в которой лазерный импульс не может распространяться, и оптически прозрачную, в которой лазерный импульс распространяется свободно. Ионизационно-радиационные процессы в этих плазмах могут существенно различаться. При этом

экспериментальные методы, ввиду короткого времени жизни плазмы, как правило не способны обеспечить измерение параметров релятивистской лазерной плазмы с необходимым временным разрешением, что делает разработку достоверных аналитических и численных методов исследования в реальной геометрии особенно актуальной. Объединение в единую систему теоретических исследований ионизационно-радиационную кинетику и основные процессы в релятивистской лазерной плазме представляется особенно важным.

В диссертации представлены результаты как разработки универсальных методов исследования ионизационной и радиационной кинетики, основанные на расширенном численном методе частицы в ячейке и уравнении Ланжевена, а также результаты использования этого метода в исследовании различных проявлений эффектов ионизации и излучения на кинетику и динамику релятивистской лазерной плазмы. Разрабатываемые методы частично являются развитием существующих методов [6-11], кинетическая часть метода, а также уравнение Ланжевена являются оригинальными.

Цель работы:

1. Разработка численных и аналитических методов описания ионизационных и радиационных процессов в релятивистской лазерной плазме с учетом как кинетических, так и волновых процессов. Развитие и расширение численного метода частицы в ячейке для приведения его к соответствию решениям уравнения Фоккера-Планка с использованием уравнения Ланжевена и с включением в метод процессов ионизации и излучения. Развитие методов расчета характеристик плазмы в реальной геометрии и в различных системах отсчета.
2. Исследование влияния механизмов ионизации и излучения на процесс взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой, формирования и протекания волновых процессов, генерации сверхсильных электромагнитных

полей и ускорении ионов и электронов. Расширение численного кода на исследование эффектов обратной связи при взаимодействии лазерного излучения с плазмой.

3. Исследование прямым численным моделированием эффектов само-инжекции плазменных электронов в ускорительную фазу кильватерной волны лазерного импульса, включая параметрические резонансы и ионизационные процессы. Влияние само-инжекции на характеристики пучков ускоренных электронов.

Научная новизна:

1. Исследованы механизмы взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с плазмой с учетом кинетических процессов таких как упругие столкновения, ионизация и излучение. Для этой цели метод частицы в ячейке был расширен до соответствия решениям уравнения Фоккера-Планка с введением дополнительной кинетической сетки, использованием метода Грета-Брагинского, добавлением стохастической силы Ланжевена и силы радиационного трения.

2. Разработан и развит трехмерных код FPlaser3D позволяющий численно исследовать взаимодействие лазерного излучения и электронных пучков с плазмой методом частицы в ячейке для широкого круга параметров как плазмы, так и драйвера. Код позволяет проводить численное моделирование как в лабораторной, так и в произвольной релятивистской системах отсчета.

3. Впервые исследовано ускорение многозарядных ионов при облучении оптически плотной плазмы короткими мощными лазерными импульсами при расчетах методом частицы в ячейке. Предсказано появление анизотропии при ускорении ионов, что в последствии было обнаружено экспериментально.

Предложен новый механизм ускорения ионов в бесстолкновительной ударной волне. Численно исследован пороговый механизм ускорения ионов с массой M при параметре поля $a_0 \sim M/m_e$, когда появляется прямое ускорение ионов лазерным полем.

4. Предсказан и исследован новый механизм туннельной ионизации плазменным полем формируемым ускоренными электронами за тонкими мишенями, облучаемыми мощными лазерными импульсами. Показано, что эффективность плазменной ионизации сравнима с оптической ионизацией на облучаемой стороне мишени. Эффект был подтвержден экспериментально.
5. Предсказан эффект существенного радиационного трения в центре пятна фокусировки мощного лазерного импульса с $a_0 > 50$ на примере фольги меди. Показано также, исходя из прямых измерений, что влияние излучения на кинетику и спектры плазмы проявляется уже при существенно меньших интенсивностях.
6. Предложен метод формирования оптически плотной плазменной волны, имеющей фазовую скорость сравнимую или даже превышающую скорость света, и который отличается от релятивистской волны в теории Семенов-Лэмпе и плазменного релятивистского зеркала. Численные исследования отражения когерентного излучения от такой плазменной волны методом частицы в ячейке показали перспективность данного направления для формирования коротких когерентных рентгеновских импульсов.
7. Исследовано влияние широкого класса процессов распада плазменной волны, создаваемой при распространении мощных фемтосекундных лазерных импульсов в плазме на само-инжекцию плазменных электронов в ускоряющую фазу кильватерного поля этих лазерных импульсов. Предсказан и исследован ряд параметрических эффектов приводящие к контролируемой само-инъекции плазменных электронов.
8. Исследовано влияние оптической ионизации на распространение мощных лазерных импульсов в плазме методом частицы в ячейке. Показано, что даже когда влияние процесса оптической ионизации на распространение лазерных импульсов мало, появляются новые эффекты такие как излучение в терагерцовом диапазоне, ионизационная инжекция плазменных электронов в ускоряющую фазу кильватерного поля и другие.

Автор выносит на защиту:

1. Многофункциональный код FPlaser3D, рассчитывающий характеристики релятивистской лазерной и пучковой плазмы методом частицы в ячейке в реальной геометрии. Параллельный и векторный код позволяет проводить расчеты в произвольной релятивистской системе отсчета.

2. Технику уравнения Ланжевена, включая стохастическую силу для одинаковых частиц, для расчетов характеристик столкновительной плазмы методом частицы в ячейке. Доказательство соответствия метода частицы в ячейке решениям уравнения Фоккера-Планка.

3. Расширение метода частицы в ячейке для расчета кинетических характеристик релятивистской лазерной плазмы на основе метода Брагинского-Греда через введение специальной кинетической сетки. Разработку методов расчета ионизации и излучения лазерной плазмы.

4. Формирование и описание скрещенной ионизационной волны с фазовой скоростью в области пересечения волн близкой к скорости света, и даже превышающей ее. Аналитическое и численное доказательство возможности разработки конвертора лазерного излучения ИК и видимого диапазона в когерентное рентгеновское излучение фемтосекундной длительности в диапазоне порядка 1 кэВ.

5. Обнаружение и описание процесса туннельной ионизации многозарядных ионов плазменным полем с теневой стороны твердотельных мишеней, облучаемых мощными фемтосекундными лазерными импульсами. Доказательство ее эффективности при численных расчетах методом частицы в ячейке.

6. Предсказание и описание эффекта сильного радиационного трения при взаимодействии мощного лазерного излучения с плазмой.

7. Численное исследование процесса само-инжекции плазменных электронов в ускоряющую фазу кильватерной волны мощного лазерного импульса методом частицы в ячейке. Аналитическое и численное описание

само-инжекции электронов как результата параметрического резонанса плазменных волн, индуцированного лазерным импульсом.

Достоверность и обоснованность:

1. Для задач численного описания ионизационно-радиационной кинетики релятивистской лазерной плазмы использовался трехмерный код FPlaser3D, достоверность которого определялась как сравнением классических результатов, полученных кодом с результатами известных американских и европейских кодов таких как OSIRIS, FBPIC, WARP, REMP с выполнением значительного количества тестовых процедур, а также сравнением значимых результатов с экспериментальными измерениями, проводимыми на ультрасовременных лабораторных установках.

2. В задаче разработки и применения уравнения Ланжевена в технике частицы в ячейке метод расчета был верифицирован как классическими тестовыми задачами такими как проблемы убегающих электронов, спитцеровская проводимость, так и сравнением результатов расчетов с расчетами на основе уравнения Фоккера-Планка и экспериментами.

3. Для задач ускорения заряженных частиц сверхсильными полями, создаваемыми лазерными импульсами в плазме, проведено детальное сравнение с экспериментами на мощных лазерных установках групп T12 (Университет гор. Токио), установки J-CUREN-P (QST, Япония), установках P3 и LAPLACIAN (Университет гор. Осака). Проведен критический анализ эффекта порядка взвешивания токов и поправок к дисперсионной части в уравнениях метода частицы в ячейке, что существенно улучшило достоверность расчетов ускорения электронов в кильватерной волне лазерных импульсов.

Практическая ценность работы:

1. Разработанные численные и аналитические методы описания

ионизационной и радиационной кинетики релятивистской лазерной плазмы, в виду отсутствия экспериментальных методов с необходимым временным разрешением, являются важнейшим базисом для выявления основных физических характеристик плазмы, создаваемой мощными фемто-секундными лазерными импульсами. Работы автора [A1-A97] составили теоретическую основу проектов IMPACT и MIRAI кабинета министров и министерства науки и технологии Японии (2011-2024) по разработке полностью оптических ускорителей.

2. Результаты работы легли в основу численных кодов: трехмерного FPlaser3D и двухмерного Fplaser2D для моделирования взаимодействия мощных лазерных импульсов и пучков заряженных частиц с плазмой. Численный код позволил провести углубленный анализ кинетических процессов в релятивистской плазме, в частности процессов инжекции и ускорения электронов плазмы до ультрарелятивистских энергий. Полученные решения были использованы для разработки стратегии по созданию полностью оптических плазменных ускорителей электронов.

3. Разработка уравнений Ланжевена применительно к моделированию плазмы методом частицы в ячейке позволяет существенно расширить возможности моделирования плазмы, включая сложносоставные плазменные образования. Кинетический подход в моделировании представляет практический интерес и находит применение для широкого круга плазменных объектов. Его реализация в виде параллельного кода существенно расширила границы практического плазменного моделирования.

4. Включение радиационной кинетики в описание сложных релятивистских плазменных объектов позволило расширить класс решаемых сложных, много параметрических задач. В случае релятивистской лазерной плазмы добавление радиационной силы трения в уравнение движения заряженных частиц позволило решить фундаментальную задачу учета коротковолнового излучения на

динамику плазмы, что было невозможно из-за проблемы пространственного разрешения в методе частицы в ячейке.

5. Работа по проблеме контролируемой само-инжекции плазменных электронов в ускорительную фазу кильватерной волны лазерного импульса является основой для развития и совершенствования лазерных ускорителей электронов. Аналитическое описание и численные исследования, проведенные в диссертации, позволили выделить класс наиболее перспективных для практического применения процессов, включая параметрические.

6. Работы автора по ускорению многозарядных ионов короткими лазерными импульсами положили начало перспективному для медицинских приложений направлению развития ускорителей.

Таким образом, в результате проведенных работ была решена научная проблема, имеющая важное значение для развития нового класса ускорителей частиц, для разработки новых источников коротковолнового излучения и для более глубокого понимания фундаментальных процессов в новом физическом объекте – релятивистской лазерной плазмы.

Личный вклад автора:

Представленные в диссертации результаты являются оригинальными и получены автором как лично, так и в рамках совместных исследований. Разработка кодов FPlaser3D и FPlaser2D выполнена автором единолично. Выявление и описание основной части новых физических явлений, представленных в диссертации, выполнено автором. В работах, содержащих экспериментальные результаты, автор обеспечивал теоретическую и численную поддержку исследований.

Апробация и публикации:

Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях (МК) и симпозиумах в том числе:

Laser and Particle Beams Workshop 2003, Oxford,
Laser and Particle Beams Workshop 2005, Taipei, Taiwan
Laser and Particle Beams Workshop 2007, Azores, Portugal
Laser and Particle Beams Workshop 2009, Kardamili, Greece
Annual meetings of Plasma Physics Division of American Physical Society
Annual meetings of Japan Physical Society 2004-2019, Japan
International and Domestic JAEA conferences 2000-2015, Kyoto, Japan
International conference at Spring-8, RIKEN 2011, 2017, Hyogo, Japan
International workshops of QST 2016-2019, Kizugawa, Japan
High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 2016, Chiba, Japan
International conference on High Energy Density Science, HEDS 2012-2019,
Yokohama, Japan
International Conference QBASIS2023, Sanken, Osaka, Japan, 2023

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [A1-A98].

Структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, 7 глав, Заключения и имеет объем 380 страниц, включая 191 рисунок. Список цитированной литературы включает 185 работ.

Содержание диссертации:

Диссертация состоит из 7 глав, Введения и Заключения. Во Введении дано обоснование актуальности исследования кинетики релятивистской лазерной плазмы, обсуждена уникальность релятивистской лазерной плазмы и обоснована важность и своевременность решения задач ее ионизационной и радиационной кинетики. Дано краткое описание содержания глав диссертации.

В **первой главе** обрисован круг физических явлений в лазерной плазме, для исследования которых единственным методом является метод частицы в ячейке [6,7]. Однако недостатки метода частицы в ячейке такие как численный нагрев, отличие численной скорости света в вакууме от реальной и связанное с этим

численное черенковское излучение и другие численные эффекты [11] требуют тщательного обоснования способа использования метода для задач физики релятивистской лазерной плазмы. В частности, обсуждаются это применительно к современным проблемам лазерного ускорения частиц, формированию источников ультракороткого рентгеновского излучения [12-17]. Приведены и обсуждаются общие принципы численного исследования кинетики и динамики релятивистской лазерной плазмы основанных на методе частицы в ячейке.

В части 1.1 дан обзор существующих многомерных параллельных численных кодов, подходящих для моделирования релятивистской лазерной плазмы как оптически прозрачной, так и оптически плотной; обсуждается наиболее популярный подход (метод Yee и схема Бориса) для исследования релятивистской лазерной плазмы численным методом с использованием векторного и параллельного программирования. Обсуждаются также недостатки подхода, варианты их исправления и круг задач для которых эти исправления принципиальны.

В части 1.2 приведена модель расчета методом частицы в ячейке в реальной геометрии [A20, A23, A40, A42, A44, A48]. Приведены схемы расчета уравнений Максвелла, обсуждены положительные стороны и недостатки методов расчетов полей. Подробно обсуждается взвешивание токов в трехмерной геометрии, что является основополагающей частью метода, обеспечивающая аккуратность вычислений [18] как динамики плазмы, так и ее кинетики. Определены варианты граничных и начальных условий необходимых для правильного вычисления параметров плазмы, приведена и обсуждена техника движущегося окна. Особое внимание уделено проблеме дисперсии в методе частицы в ячейке. Обсуждаются методы преодоления проблемы численного черенковского излучения [A88].

В части 1.3 рассматривается подход к моделированию релятивистской лазерной плазмы в произвольной системе отсчета [19, A95]. Обсуждаются трудности обратного преобразования Лоренца, особенно в системах отсчета с высокими релятивистскими факторами, обосновывается необходимость

использования возможных инвариантов для конкретных физических задач. Обсуждаются проблемы с моделированием распространения лазерных импульсов в плазме оптически прозрачной в лабораторной системе отсчета и оптически непрозрачной в релятивистской системе отсчета. Рассматривается проблема численной черенковской неустойчивости для плазмы и существующие решения этой проблемы [A88, 20].

В части 1.4 рассматривается расширение метода частицы в ячейке для учета радиационно-ионизационной кинетики релятивистской лазерной плазмы. Обосновывается необходимость дополнительной кинетической сетки в методе, позволяющей корректно определять макропараметры плазмы такие как температура, средняя скорость, плотность, вязкость и прочее [A1-A10]. Обосновывается необходимость дополнения уравнений движения уравнением Ланжевена для корректного учета упругих столкновений в плазме. Обосновывается возможность расчета части плазменного излучения введением силы радиационного трения в уравнения движения частиц в методе [A17, A26, A61, A62]. Рассматриваются различные подходы к введению кинетики ионизации в метод частицы в ячейке [A5, A44, A84].

В части 1.5 представлено описание трехмерного кода FPlaser3D [A40], дана его структура и особенности в части параллельных и векторных вычислений. Приведены некоторые примеры оригинальных расчетов с использованием этого кода. В приложении представлены тексты подпрограмм взвешивание тока и движения электронов на языке Фортран90.

В **второй главе** развита техника уравнения Ланжевена для метода частицы в ячейке, необходимая для корректного учета упругих столкновений, особенно для столкновений одинаковых частиц [A1-A4, A76]. Именно уравнение Ланжевена позволяет естественным образом разделить такие характеристики функции распределения частиц как их средняя скорость и температура. Показано, что с введением стохастической силы в уравнение движения частиц результаты, полученные методом частицы в ячейке, полностью соответствует

решению соответствующего уравнения Фоккера-Планка с интегралом столкновения Ландау. Даны конкретные примеры, доказывающие эффективность и корректность метода.

В части 2.1 даны основные определения корреляций скоростей частиц, участвующих в случайных столкновениях, показывается их прямая связь с уравнением Фоккера-Планка. Даны определения потенциалов Розенблюта-Трубникова [21], необходимые в дальнейшем для эффективного вычисления.

Фундаментальным соотношением, позволяющим ввести случайную силу для столкновений частиц сорта a с частицами сорта b , является связь между корреляционными функциями скорости частиц в плазме Δv , потенциалами Розенблюта-Трубникова и известными коэффициентами уравнения Фоккера-Планка A, B :

$$A_i^{ab} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \langle \Delta v_i^{ab} \rangle = N_b \int f_b(\vec{v}_b) w_i^{ab} d\vec{v}_b; \quad (1)$$

$$B_{ij}^{ab} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \langle \Delta v_i^{ab} \Delta v_j^{ab} \rangle = N_b \int f_b(\vec{v}_b) W_{ij}^{ab} d\vec{v}_b; \quad (2)$$

где корреляционные функции w и W даются следующими выражениями [21]

$$w_i^{ab} = -\frac{\mu}{M_a} (v_i^a - v_i^b) |\vec{v}_a - \vec{v}_b| \sigma_1 (|\vec{v}_a - \vec{v}_b|), \quad (3)$$

$$W_{ij}^{ab} = \left(\frac{\mu}{M_a} \right)^2 |\vec{v}_a - \vec{v}_b|^3 \left[\delta_{ij} \frac{\sigma_2}{2} + \frac{(v_i^a - v_i^b)(v_j^a - v_j^b)}{|\vec{v}_a - \vec{v}_b|^3} \left(\sigma_1 - \frac{3}{2} \sigma_2 \right) \right]$$

Здесь M_a, M_b массы частиц и v_a, v_b их скорости, $\mu = M_a M_b / (M_a + M_b)$ приведенная масса, N_b, f_b плотность и функция распределения по скоростям частиц сорта b ,

$$\sigma_1 = \int (1 - \cos\theta) d\sigma; \quad \sigma_2 = \int (1 - \cos^2\theta) d\sigma$$

транспортные сечения рассеяния и $d\sigma$ дифференциальное сечение рассеяния. Уравнения (1)-(3) позволяют определить связь корреляционной функции скорости с параметрами распределения рассеивающих частиц. Для полной

картины процесса нужно определить характер рассеяния, то есть случайный процесс, который будет описывать изменение заданной численной частицы в акте столкновения.

В части 2.2 даны определения случайных гауссовских процессов [22] и дан вывод уравнения Ланжевена для столкновений заряженных частиц в плазме. Показан аккуратный метод вычисления квадратного корня матрицы и важность корректного результата для использования уравнения Ланжевена в методе частицы в ячейке. Важным здесь является определение интеграла по времени от случайного процесса ξ :

$$\int_t^{t+\Delta t} \xi dt = p\sqrt{\Delta t}$$

(где p – случайное число с гауссовским распределением), дисперсия которого зависит от процесса в плазме. Это соотношение используется при вычислении корреляционных функций скорости (1) и (2). При этом при использовании корреляционной функции второго порядка приходится вычислять корень матрицы. Наиболее просто это выглядит для потенциалов с функциями распределения Греда [23]. Получаемая матрица имеет вид:

$$B_{ij} = B_1 \delta_{ij} - B_2 \frac{v_i v_j}{v^2},$$

причем $B_1 > B_2$. Корни такой матрицы легко вычисляются и равны соответственно:

$$\sqrt{B_{ij}} = \pm \left(\sqrt{B_1} \delta_{ij} - \left(\sqrt{B_1} \pm \sqrt{B_1 - B_2} \right) \frac{v_i v_j}{v^2} \right),$$

Имеем четыре корня матрицы 3x3. При этом два корня вырождены и значение имеют только два из них. В [22] пренебрежение вторым корнем привело к некорректной силе Ланжевена. Наличие двух корней вынуждает использование двух случайных процессов, если оставаться в приближении гауссовских

случайных процессов. Для девяти-моментного приближения Греда [23] случайная сила для электронов имеет вид [A4, A5]:

$$\begin{aligned} \vec{F}_e = & -4\pi\Lambda \left(\frac{e^2}{m}\right)^2 \left[Z^2 N_i \frac{m \vec{v}}{M v^3} + N_e \left(\frac{4 \vec{w}}{v_T^2 w} G(w) - \frac{4(\vec{q}\vec{w})\vec{w}}{5 v_T^4} \Phi'(w) \right) \right] \\ & + \frac{e^2}{m} \sqrt{\frac{4\pi\Lambda Z^2 N_i}{v}} \left(\vec{\zeta} - \frac{\vec{v}(\vec{\xi}\vec{v})}{v^2} \right) + \\ & \frac{e^2}{m} \sqrt{\frac{4\pi\Lambda N_e}{v_T w}} \left[\sqrt{\Phi(w) - G(w)} \left(\vec{\zeta} - \frac{\vec{w}(\vec{\zeta}\vec{w})}{w^2} \right) + \sqrt{2G(w)} \frac{\vec{w}(\vec{\eta}\vec{w})}{w^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь N_i, N_e - плотность ионов и электронов плазмы, v - скорость электрона, $\vec{w} = \vec{v} - \vec{u}$, где \vec{u} - средняя скорость электронов, v_T, q - их тепловая скорость и тепловой поток, Λ - кулоновский логарифм, ξ, ζ, η - три случайных независимых гауссовских процессов, $\Phi(w)$ - функция ошибок, $G(w) = (\Phi - w d\Phi/dw)/2w^2$. Более общие выражения для силы Ланжевена даны в [A76]. Параметры функции распределения должны рассчитываться на специальной кинетической сетке, размеры ячейки которой должны соответствовать длине свободного пробега частиц, что в идеальной плазме много больше размеров дебаевского радиуса.

В части 2.3 рассмотрены процессы убегания электронов в плазме в постоянном электрическом поле и процессы переноса тепла методом частицы в ячейке уравнением Ланжевена и с дополнительной кинетической сеткой. Показано полное соответствие решений методом частицы в ячейке решениям уравнения Фоккера-Планка при точном вычислении спитцеровской проводимости. Задача убегających электронов в постоянном электрическом поле [24-26, A3, A76] является классической тестовой задачей правильности учета столкновений в методе частицы в ячейке. Второй такой задачей является расчет температурного распределения в плазме, ограниченной стенками с температурой T_1 и T_2 . Такие задачи были решены в [A3, A4, A76]. Великолепное согласие с аналогичными решениями кинетического уравнения Фоккера-Планка [24-26] подтвердило

корректность метода уравнения Ланжевена. Более того, уравнение Ланжевена позволило добиться аккуратного вычисления спитцеровской проводимости без особых затрат, что весьма затруднено в прямом решении уравнения Фоккера-Планка.

В части 2.4 в развитие метода рассмотрены процессы взаимодействия коротко-импульсного лазерного излучения с плазмой плотных мишеней с учетом упругих столкновений. Показано полное соответствие результатов метода решениям уравнения Фоккера-Планка для тех физических задач, где численные решения уравнения Фоккера-Планка найти удастся. Показана важная роль обратного тока в кинетике лазерной плазмы, расчет которого возможен только методом частицы в ячейке включающим столкновения. Низкая энергия электронов в обратном токе делает их упругие столкновения с ионами и их ионизацию важными для кинетики плазмы. В методе частицы в ячейке поглощение лазерного излучения плазмой считается *ab initio*, тогда как для решения уравнения Фоккера-Планка данные по поглощению лазерного излучения приходится задавать исходя из экспериментальных данных.

В части 2.5 обсуждается расширение метода уравнения Ланжевена на немаксвелловскую плазму. Такая проблема возникает особенно остро при столкновении плазменных потоков высокой плотности. Показана возможность выделения групп в ансамблях одинаковых частиц, для которых можно ввести понятие температуры и средней скорости, что позволяет сделать уравнение Ланжевена практичным. Обсуждается тестовая задача о релаксации функции распределения в двух сталкивающихся плазменных объектах за счет упругих столкновений. Проблема здесь возникает из сложности вычисления потенциалов Розенблюта в реальной геометрии для произвольного распределения частиц по энергиям. Радикально упростить задачу удастся исходя из простого факта независимости столкновительных процессов. Независимы не только столкновения между разными частицами, но и столкновения между группами одинаковых частиц. При этом практически всегда можно выделить группы с

квази-максвелловским распределением по энергиям, для которых приближение Грета выполняется с хорошей точностью

$$f(\vec{v}_1 \dots \vec{v}_i \dots \vec{v}_N) = \sum_M f_M^{Gred}(\vec{v}_1 \dots \vec{v}_s)$$

Для учета столкновений между группами одинаковых частиц приходится вводить соответствующее количество случайных процессов. Эффективность метода здесь показана на примере двух сталкивающихся плазменных объектов [A76].

В **третьей главе** рассматривается наиболее органичный подход к вычислениям ионизационной кинетики релятивистской лазерной плазмы методом частицы в ячейке. Вопрос ионизации возникает особенно остро при взаимодействии мощного лазерного излучения с мишенями элементов с высокими зарядами. Появляется дополнительный ионизационный процесс: туннельная ионизация полем как лазерным [27,28], так и плазменным. При современных интенсивностях фемтосекундного лазерного излучения до $I \sim 10^{23}$ Вт/см² оптическая и столкновительная ионизация приводит к формированию ионов с зарядами $Z \sim 50$ [29,30]. При этом плотность плазмы в процессе взаимодействия с лазерным излучением может меняться почти на два порядка величины. Понятно, что ионизационная кинетика в этом случае становится ключевой. В ряде случаев ионизационное поведение примесных добавок с высокими зарядами является предметом специального исследования, например, для организации инжекции электронов в ускоряющую фазу кильватерной волны лазерного импульса. Расчеты таких процессов, как показывается, требуют особого подхода в их численном анализе.

В части 3.1 приведены общие принципы вычисления ионизационной кинетики в методе частицы в ячейке. Обсуждаются два принципиально разных подхода к вычислению ионизационного баланса в лазерной плазме: переменное число частиц и переменный вес частиц. Выявляется основная разница подходов и

области их применения. Метод переменного числа частиц интуитивно более понятен, рост или уменьшение степени ионизации плазмы пропорционально связана с количеством численных частиц, участвующих в расчетах. Метод переменного веса частиц существенно проще в реализации, вес или заряд численных частиц меняется в соответствии с ионизационной кинетикой плазмы. Есть и третий подход, когда для разных процессов ионизации – рекомбинации вводятся разные численные частицы. Такая необходимость возникает, если специальная группа электронов или ионов используется для дальнейших расчетов физических процессов.

В части 3.2 дан анализ подходов к ионизационной кинетике для основных процессов таких как столкновительная и полевая ионизация ионов плазмы. Обсуждается новый процесс характерный для релятивистской лазерной плазмы – туннельная ионизация ионов плазменными полями. Здесь показывается, что и для релятивистской лазерной плазмы основой для расчета кинетики являются балансовые уравнения [31]:

$$\frac{dN_k}{dt} = (S_{ek-1}N_e + S_{k-1T})N_{k-1} - (S_{ek}N_e + R_{ek}N_e + S_{kT})N_k + R_{ek}N_eN_{k+1}, \quad (5)$$

где S_{ek} , S_{kT} – столкновительная и туннельная ионизация иона, R_{ek} суммарная рекомбинация иона с зарядом k . Балансовое уравнение (5) вычисляется для каждой кинетической ячейки [A5, A8]. Изменение плотности электронов распределяется по всем частицам этой ячейки, в зависимости от их энергии. В случае подвижных ионов меняется заряд каждой численной ионной частицы, если же ионы не участвуют в движении меняется кинетический параметр – средний заряд ионов в кинетической ячейке. Уравнение (5) можно дополнить и более общими уравнениями, включающими отрицательные ионы и химические процессы [A57]. В расчетах с переменным весом частиц изменяется вес каждой частицы в кинетической ячейке, тогда как для переменного числа частиц меняется их число при неизменном их весе. Метод переменного числа частиц

более трудоемкий, но он необходим в тех случаях, когда начальные значения электронов после ионизации важны.

В части 3.3 приведен анализ ускорения многозарядных ионов в плотной плазме [32, A6-A12, A14-A16, A19], формируемой мощными лазерными импульсами. Рассмотрены различные механизмы ускорения ионов и влияние ионизации на процесс их ускорения. Особенностью ускорения ионов мощными фемто-секундными лазерными импульсами является анизотропия распределения ускоренных ионов по скоростям [A6, A7] в отличие от этого процесса с участием наносекундных лазерных импульсов. Этот факт был доказан экспериментально. Можно выделить три основных процесса ускорения многозарядных ионов: назад и вперед с передней поверхности мишени, вперед с теневой поверхности мишени. Во всех этих процессах ионизация играет ключевую роль. Было показано, что для расчетов методом частицы в ячейке в данном случае можно пользоваться приближением переменного веса частиц с ограничением по энергии ионов. Если на передней стороне мишени оптическая ионизация способна привести к существенной ионизации ионов, то с теневой стороной вопрос оставался открытым, при том что эффективность такого ускорения должна была быть самой высокой. Впервые теоретически удалось показать, используя метод частицы в ячейке, что ионизация плазменным полем, создаваемым быстрыми электронами, может иметь такую же высокую эффективность, как и оптическая ионизация [A8]. Позднее это было подтверждено экспериментально [33].

В части 3.4 анализируется распространение мощного лазерного излучения в газах с учетом их оптической ионизации [A23, A38, A44, A45, A47, A56]. Приводятся основные закономерности формирования ускоренных частиц в такой плазме. Анализируются характеристики процесса ионизационной инжекции электронов плазмы в ускоряющую фазу кильватерной волны лазерного импульса для смесей газов. Из-за низкой плотности ионизационный процесс в газах в основном связан с оптической ионизацией, которая имеет

специфику. В случае тяжелых газов учет ионизации необходим, так как это процесс меняет оптическую плотность плазмы. Как правило можно использовать приближение переменного веса численных частиц. Но ряд процессов, таких как рассеяние на ионизационной волне (глава 4) и ионизационной инжекции требуют использования приближения переменного числа частиц.

В четвертой главе обсуждается новое направление формирования когерентного коротковолнового излучения на оптических ионизационных волнах в плазме или плазменные конверторы рентгеновского излучения. Обсуждаются их преимущества по сравнению с другими источниками когерентного рентгеновского излучения такими как релятивистские плазменные зеркала. Практическая возможность появилась с появлением очень коротких лазерных импульсов.

В части 4.1 обсуждается упрощенная теория Семеновской-Лэмпе [34,35] по отражению излучения от ионизационной волны, рассмотренная в релятивистской системе отсчета. Выявлено противоречие упрощенной теории, приводящей к условию оптической прозрачности, зависящему от системы отсчета. Основой теории Семеновской-Лэмпе является уравнение:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V_0 \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{e}{m} \left[E + \frac{V_0}{c} B \right], \quad (6)$$

где V_0 - собственно скорость зеркала. Это упрощает последующее решение с учетом одномерных уравнений Максвелла. Однако уравнения в [34,35] никак не учитывают наличие градиента плотности и справедливы для любой плазмы, что вызывает противоречие с условиями прозрачности в лабораторной системе отсчета. Показана необходимость численного исследования проблемы методом частицы в ячейке в лабораторной системе отсчета. Плазменная волна, формируемая оптической ионизацией, принципиально отличается от плазменного зеркала [A45, A47]. Слабой частью таких объектов (зеркал) является факт снижения плазменной частоты из-за релятивистского эффекта

$m \rightarrow m/(1-V_0^2/c^2)^{1/2}$. В оптической плазменной волне релятивистский эффект для электронов отсутствует, что делает ее привлекательнее для работы в рентгеновском диапазоне рассеянных волн.

В части 4.2 обсуждаются процессы создания ионизационных волн образующих плотную плазму и имеющие фазовую скорость сравнимую и даже превышающую скорость света. Показано, что такие волны могут формироваться за счет оптической ионизации плотных газов. Два и более скрещенных лазерных импульсов распространяющиеся под углом могут формировать в точке пересечения плазму с фазовой скоростью близкой и даже превышающей скорость света. Из-за высокой скорости оптической ионизации фронт такой волны крутой; на таком фронте лазерное излучение с частотой меньшей плазменной частоты будет отражаться с доплеровским сдвигом.

В части 4.3 анализируется отличие плазменного конвертора от плазменного зеркала, формируемого на релятивистских плазменных волнах [A44]. В отличие от плазменного зеркала, где должно происходить усиление отраженного излучения одновременно с доплеровским изменением его частоты, плазменные волны не меняют энергию отраженного когерентного импульса, а только преобразуют его частоту. Показано, что для ионизационной плазменной волны уравнение для поля отличается существенно граничным условием:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) A(x, t) + \omega_{pi}^2 \eta \left(t - \frac{x}{V} \right) \left[A(x, t) - A(x, t + \frac{x}{V}) \right] = 0 \quad (7)$$

Наличие граничного условия в уравнении принципиально меняет и условия численного его моделирования методом частицы в ячейке.

В части 4.4 приведены результаты расчетов характеристик плазменного конвертора методом частицы в ячейке с учетом граничного условия равенства нулю начальной скорости электронов, появившихся в плазме в результате оптической ионизации [A44]. Это потребовало использование метода переменного числа частиц. Двумерные расчеты рассеяния когерентного

излучения на ионизационной волне методом частицы в ячейке удалось провести только для $V=0.9c$. Однако одномерный расчет удалось выполнить для широкого диапазона скоростей ионизационной волны. Результаты показали высокую перспективность такого метода формирования рентгеновского когерентного излучения. Показывается также возможность формирования банчей (коротких импульсов) когерентного рентгеновского излучения с произвольной скважностью.

В пятой главе рассматривается проблема учета излучения релятивистской лазерной плазмы в методе частицы в ячейке [A17, A26, A58, A61-A64, A66, A67, A71, A75, A82]. Генерация излучения релятивистской лазерной плазмы очень часто является самостоятельной задачей, имеющей практическую ценность. Поскольку релятивистская лазерная плазма имеет сильно неравновесное распределение частиц по энергиям, то самосогласованное вычисление и анализ такого излучения может проводиться только методом частицы в ячейке. Однако излучение, генерируемое в большинстве физических процессов в релятивистской лазерной плазме, имеет коротковолновый спектр. Такое излучение не может вычисляться напрямую, поскольку минимальное пространственное разрешение ($\lambda/8-\lambda/16$) для такого излучения требует огромных вычислительных ресурсов, часто недоступных на сегодняшний день. Проблема усугубляется тем, что излучение лазерной плазмы может давать существенный вклад в энергобаланс плазмы [A17].

В части 5.1 обсуждается проблема анализа радиационной кинетики релятивистской лазерной плазмы, где наряду с известными процессами излучения появляется ряд новых, связанных с сильной неравновесностью такой плазмы. Определены процессы и область параметров, при которых имеется возможность прямого вычисления радиационных характеристик в методе частицы в ячейке. Одновременно показывается существенная область параметров как плазмы, так и лазерного излучения, которая технически выпадает из возможности прямого вычисления. Более того в релятивистской

лазерной плазме излучение может сильно повлиять на динамику горячей компоненты плазмы [A17]. Впервые показана возможность учета радиационной кинетики такой плазмы введением радиационной силы трения в методе частицы в ячейке. В классическом случае сила определяется известным выражением:

$$\vec{F} = \frac{2e^3}{3mc^3}(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{d\vec{E}}{dt} + \frac{\vec{\beta}d\vec{B}}{dt} \right] + \frac{2e^4}{3m^2c^4} [\vec{E} \times \vec{B} + \vec{B} \times (\vec{B} \times \vec{\beta}) + \vec{E}(\vec{E}\vec{\beta})] - \frac{2e^4}{3m^2c^4(1-\beta^2)} \vec{\beta} \left[(\vec{E} + \vec{B} \times \vec{\beta})^2 - (\vec{E}\vec{\beta})^2 \right] \quad (8)$$

где

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}\vec{\nabla}; \quad \vec{\beta} = \vec{v}/c,$$

\mathbf{E} и \mathbf{B} - суммарные электрическое и магнитное поля действующие на электрон плазмы, движущийся со скоростью \mathbf{v} в этих полях. Для релятивистской лазерной плазмы основным в уравнении (8) является последний член ответственный за комптоновское рассеяние. Уравнение (8) не дает возможности посчитать спектры коротковолнового излучения, однако может определить полные радиационные потери электрона поскольку они определяются произведением \mathbf{vF} . Классическая сила радиационного трения легко вводится в уравнения метода частицы в ячейке. Однако введение силы трения не всегда необходимо, в ряде случаев если позволяют вычислительные мощности, излучение плазмы вычисляется напрямую [A62]. В последнее время классическую силу радиационного трения (8) пытаются заменить на ее квантовый аналог [36-39]. Здесь, однако, этот подход сталкивается с трудностями, в частности, с эффектом пондеромоторного рассеяния электронов лазерным импульсом, который является чисто классическим и полностью отсутствует при квантовом подходе [A62].

В части 5.2 проводится анализ и обсуждаются результаты прямого вычисления характеристик излучения в терагерцовом диапазоне, формируемого на ионизационном фронте коротких лазерных импульсов в газовых мишенях [A58, A62]. Показана возможность генерации селективных мод терагерцового

излучения. Рассмотрен случай формирования терагерцового излучения на ионизационном фронте распространяющегося фемтосекундного лазерного импульса методом частицы в ячейке. Здесь удалось провести вычисления характеристик излучения напрямую.

В части 5.3 впервые показана важность учета радиационных потерь при облучении мишеней мощным коротким лазерным излучением. Рассмотрен радиационно-доминантный режим (РДР) в плазме прямым численным вычислением методом частицы в ячейке [A17]. На примере медной фольги впервые показано существенная роль радиационных потерь не только на энергобаланс плазмы, но и на динамику высокоэнергетичных электронов плазмы. Основные потери на излучения в релятивистской лазерной плазме составляют обычно комптоновское рассеяние лазерного излучения на высокоэнергетичных электронах. Обсуждаются современные подходы к учету силы радиационного трения и существующие проблемы.

В части 5.4 рассматривается радиационно-кинетически-доминантный режим в релятивистской лазерной плазме, который является промежуточным по отношению к РДР, но который фиксируется экспериментально уже при существующих лазерных мощностях [A61, A64, A67, A71]. В отличие от РДР этот режим проявляется в особенности кинетики периферийной области плазмы, облучаемой мощным рентгеновским излучением из пятна лазерной фокусировки, в частности появлением спектров двойных полых атомов. Объясняется природа нелинейного роста излучения плазмы с ростом мощности лазерного импульса.

Шестая глава диссертации посвящена ускорению электронов в релятивистской лазерной плазме [40,41]. Этот процесс безусловно является одним из важных аспектов кинетики релятивистской лазерной плазмы. Кроме того, эта тема особенно актуальна в настоящее время в связи с развитием полностью оптических ускорителей электронов свободных от временного дрожания-джитера [A20-A22, A24, A27-A35, A37-A40, A42, A48, A51, A54, A56,

A68-A70, A77, A80, A85-A92, A94, A97]. И хотя тематика начинается с 1979 года от работы Таджимы и Даусона [40], практическая разработка оптических ускорителей потребовала существенного научного развития как базовых принципов, так и прикладных аспектов тематики.

В части 6.1 рассмотрены основные принципы ускорения электронов в кильватерной волне релятивистского лазерного импульса [41]. Обозначены основные процессы, отвечающие за стабильность ускорения и нуждающиеся в дополнительном развитии и более глубоком научном понимании. Обсуждается важность процессов инжекции плазменных электронов в ускоряющую фазу кильватерного поля для создания полностью оптических электронных ускорителей.

В части 6.2 рассматриваются основные процессы в плазме, которые могут быть эффективно использованы для инжекции плазменных электронов. Показано, что все процессы по существу основаны на стохастическом или контролируемом распаде плазменной волны и само-инжекция плазменных электронов в ускоряющую фазу кильватерной волны как результат. Можно выделить несколько наиболее перспективных процессов ответственных за само-инжекцию плазменных электронов в ускоряющую фазу кильватерной волны: распад плазменной волны на градиенте плотности [A20, A24, A32, A33, A88, 42, 43], параметрические резонансы [A42, A48, A92], ионизационная инжекция [A56, A84, 44-46], столкновение двух лазерных импульсов [47], инжекция при сильной фокусировке лазерного импульса в плазме [A40] и некоторые другие.

В части 6.3 численно, с помощью многомерного метода частицы в ячейке, анализируется влияние плотности плазмы на процессы инжекции электронов плазмы. Впервые выявлены и проанализированы параметрические резонансы в лазерной плазме, которые приводят к самоинжекции плазменных электронов.

В части 6.4 рассмотрено ускорение электронов в плазме под действием лазерного излучения с $a_0 \sim 10^3$. Такие интенсивности могут быть достигнуты уже

в ближайшее время [2,3]. Супер-ускорение для электронов в кильватерной волне такого лазерного импульса настолько велико, что можно ожидать появления возможности прямого измерения эффекта Унру. Температура, введенная Унру $T_w = \hbar \omega / 2\pi k_B c$ при ускорении $\omega \sim c a_0$ и a_0 выше 100 приближается к детектируемым значениям [A83]. Исследование было проведено с учетом силы радиационного трения.

В **седьмой главе** проведен подробный анализ влияния структуры лазерного импульса на кинетику релятивистской лазерной плазмы. Впервые показано, что наличие наносекундного, пикосекундного пред-импульсов и наличие гало в пятне фокусировки могут существенным образом исказить картину взаимодействия мощного лазерного излучения даже с плазмой низкой плотности.

В части 7.1 обсуждается структура мощных лазерных импульсов, показаны причины формирования структуры, даны необходимые определения. Обсуждаются достоинства и недостатки методов коррекции структуры лазерных импульсов.

В части 7.2 рассмотрено влияние лазерного пред-импульса на взаимодействие релятивистского лазерного излучения с твердой мишенью. Обсуждаются положительные и отрицательные эффекты пред-импульса на кинетику лазерной плазмы. Показано, что изменение пространственного распределения плотности, формируемое лазерным пред-импульсом, радикально меняет характер взаимодействия. В частности, поглощение лазерного излучения может существенно вырасти. Решение задачи в данном случае требует объединения различных подходов. Так влияние пред-импульса считается в гидродинамическом приближении, а взаимодействие полученной плазмы с мощным лазерным излучением [A5, A7, A9, A22, A25]. В ряде случаев требуются иные подходы к моделированию пред-импульса, например, молекулярная динамика [A10], если в ходе его действия происходит разрушение поверхности мишени.

В части 7.3 анализируется влияние структуры лазерного импульса на взаимодействие лазерного излучения с плазмой низкой плотности. Впервые было показано, что оптический пробой формируемый наносекундным пред-импульсом и оптическая ионизация пикосекундным пред-импульсом радикально меняют картину взаимодействия [A18, A21, A36]. В ряде случаев влияние пред-импульса положительно [A29, A30, A31, A39, A81]. Пред-импульс формирует плазменный канал в области фокусировки лазерного импульса, приводит к росту стабильности формирования ускоренных электронов [A51б A55]. В ряде случаев наличие пред-импульса позволяет управлять формируемыми пучками ускоренных электронов [A68]. При достаточно высоких мощностях лазерного излучения эффекты ореола фокусированного лазерного импульса становятся существенными [A69, A70, A72, A73]. Релятивистская самофокусировка части лазерного излучения в гало и в части основного импульса идут по-разному, что негативно влияет на процесс ускорения электронов.

В части 7.4 обсуждается современная картина понимания условий достижения стабильности ускорения электронов в кильватерной волне лазерного импульса [A93]. Сюда вошли стабильность газового потока [A92, A93, A97], фокусировки лазерного импульса [A93, A94], инъекции плазменных и последующего ускорения электронов в кильватерной волне [A84-A87, A91]. Показано, что полностью оптические ускорители электронов до энергий порядка ГэВ приближаются к коммерческому уровню и имеют ясную нишу для их применения [A95].

В Заключении перечислены основные результаты диссертации

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Доказано, что включение уравнения Ланжевена в метод частицы в ячейке позволяет универсальным образом учитывать упругие столкновения как различных, так и одинаковых заряженных частиц в плазме. При этом метод

частицы в ячейке расширяется с решения уравнения Власова до решения уравнения Фоккера-Планка. Правильная группировка частиц в плазме позволяет обойти трудности вычисления потенциалов Розенблюта, что существенно расширило класс задач вычисления процессов релаксации плазмы.

2. Получены и развиты методы расчета основных ионизационных процессов в методе частицы в ячейке: метод переменного веса частиц и метод переменного числа частиц. Проведен анализ области применимости каждого метода. Введение кинетической сетки в методе частиц позволило универсальным образом проводить расчеты ионизационной кинетики релятивистской лазерной плазмы как с учетом столкновительной ионизации и рекомбинации, так и с учетом туннельной ионизации.

3. Впервые включена классическая сила радиационного трения в стандартный метод частицы в ячейке, что позволило учитывать влияние коротковолнового излучения, длина волны которого выходит за рамки применимости метода, на динамику и кинетику плазмы. Прямыми вычислениями показано существование режима доминантного радиационного трения в релятивистской лазерной плазме. При участии автора было экспериментально доказано нелинейный рост коротковолнового (рентгеновского) излучения в пятне фокусировки мощного лазерного излучения уже при интенсивностях лазерного излучения $I=10^{22}$ Вт/см².

4. Развитые методы расширения метода частицы в ячейке для расчета ионизационно-радиационной кинетики плазмы позволили предсказать анизотропию ускорения многозарядных ионов из оптически плотной плазмы, облучаемой мощными суб-пикосекундными лазерными импульсами. При участии автора, анизотропия процесса ускорения многозарядных ионов в релятивистской лазерной плазме была обнаружена экспериментально. Обнаруженный эффект послужил одной из исходных точек для развития программы лазерного ускорения ионов для медицинского применения.

5. Показана возможность формирования оптически плотной плазменной волны

движущейся со скоростями близкими к скорости света и превышающими скорость света с помощью оптической ионизации газа. В развитие теории Семенов-Лампе было предложено уравнение для определения характеристик отраженного когерентного рентгеновского излучения. Применение метода частицы в ячейке показало высокую эффективность предложенного рентгеновского конвертора. Для корректного расчета характеристик рентгеновского излучения методом частицы в ячейке ионизационный процесс должен рассчитываться только в приближении переменного числа частиц для правильного соблюдения начальных условий. Показана возможность формирования модулированных когерентных рентгеновских импульсов.

6. Предсказана эффективная туннельная мишень многозарядных ионов в теневой области лазерной мишени плазменным полем. Мощные плазменные поля в теневой области плотных мишеней создаются потоками горячих электронов, формируемых в области облучения мишени лазерным импульсом. Эффективность ионизации плазменным полем может быть сравнима с оптической ионизацией.

7. Доказана важность структуры фемтосекундного лазерного импульса для формирования и кинетики релятивистской плазмы. Пред-импульс мощного лазерного излучения как в наносекундном диапазоне, обремененный усиленному спонтанному излучению, так и пикосекундный пред-импульс существенно влияют на формирование как оптически плотной плазмы, так и плазмы низкой плотности, за счет оптического пробоя. Поглощение лазерного излучения, его распространение в плазме низкой плотности, в значительной степени определяется пре-плазмой, формируемой пред-импульсом. Комбинация магнитного поля и лазерного пред-импульса позволяют управлять в частности процессом ускорения электронов в кильватерной волне. Показано, что неидеальность фокусировки лазерного импульса и появление гало также существенно влияют на распространение лазерного импульса в плазме низкой плотности из-за различия в самофокусировки гало и главной части импульса.

8. Показана впервые возможность комбинированного ускорения ионов в лазерной плазме при распространении ударной волны, создаваемой в области облучения мишени лазерным импульсом. Комбинация ускорения многозарядных ионов в ударной волне на фронте лазерного импульса и последующее их ускорение плазменным полем с теневой стороны мишени позволяет существенно увеличить как энергию ускоренных ионов, так и их заряд.

9. Впервые проведено детальное численное исследование взаимодействия λ^3 лазерного импульса с плазмой низкой плотности методом частицы в ячейке в реальной 3D геометрии. Показана уникально высокий заряд инжектированных и ускоренных электронов плазмы на уровне 30 нК на 1 Дж энергии лазерного импульса. Выявлен эффект банчировки ускоренных электронов в ходе многоступенчатой инжекции. Однако выявлена и неустойчивость распространения пучка электронов в плазме из-за его высокого заряда.

10. Разработан уникальный метод исследования характеристик ионизационной инжекции электронов методом частицы в ячейке. Разделение электронов плазмы на группы, зависящие от процесса ионизации, позволило явно выделить кинетику инжекции и захвата электронов плазменной волной. Показано, что ионизационная инжекция может быть высокоэффективной, однако возможность «размазывания» процесса захвата на несколько периодов кильватерной волны лазерного импульса. Показано, что в целом распространение лазерного излучения в тяжелых газах может рассчитываться методом переменного веса частиц в методе частицы в ячейке.

11. Впервые выявлены и исследованы процессы параметрического резонанса на кинетику инжекции электронов плазмы в кильватерной волне лазерного импульса. Прямые расчеты многомерным методом частицы в ячейке доказали их существование. Природой параметрического резонанса является периодическое изменение как поперечного, так и продольного размера лазерного импульса при его распространении в плазме. Определены характерные параметры

параметрических процессов. Параметрическая инжекция может быть важным инструментом в лазерных ускорителях электронов.

12. Впервые проведено прямое вычисление спектров комптоновского рассеяния мощного лазерного излучения на электронном пучке с учетом силы радиационного трения в классическом приближении, что позволило полностью включить эффект пондеромоторного рассеяния электронов лазерным импульсом. Подобное рассеяние, являясь чисто классическим эффектом, существенно влияет на комптоновский спектр. Показано так же, что в сильном лазерном поле комптоновское излучение существенно тормозит релятивистский электронный пучок, при этом квантовый параметр оказывается заметно меньше единицы. Так же самоизлучение снижает частоту комптоновского излучения на гармониках. Использование дополнительного, ускоряющего лазерного импульса, позволяет компенсировать эффект самоизлучения, но для не очень высоких энергий электронного пучка.

13. Проведено прямое численное исследование эффектов релятивистской прозрачности плазмы при взаимодействии с мощным лазерным импульсом. В методе частицы в ячейке была включена сила радиационного трения. В отличие от общепринятого мнения, что условия $N_e/(a_0 N_{cr}) < 1$ достаточно для оптической прозрачности плазмы, расчеты показали конечность распространения лазерного излучения вглубь плазмы. При интенсивностях $a_0 > 10^3$ было обнаружен существенный эффект прямого ускорения протонов лазерным импульсом, что приводит к нелинейной зависимости энергии ускоренных протонов от плотности плазмы. Радиационное трение незначительно стабилизирует кильватерный след лазерного импульса.

14. Были выявлены основные источники неустойчивости ускорения электронов до высоких энергий в кильватерных волнах лазерных импульсов в газовых потоках. К ним были отнесены неустойчивость лазерного импульса, газовой мишени, процесса инжекции электронов, распространение собственно лазерного импульса и линия формирования пучка. Проведенные расчеты показали пути

преодоления указанных неустойчивостей, что ускорит дальнейшее развитие компактных, свободных от шумов, полностью оптических ускорителей электронов.

Работы по теме данной диссертации были поддержаны Институтом Общей Физики РАН и министерством науки и технологии Японии (проект ИМПАКТ кабинета министров Японии и проект МИРАЙ ДжСТ), университета гор. Осака, Национальным Институтом Квантовых Наук и Технологий Япония.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

A1. Zhidkov A.G., Simulation of the Ion Extraction from Laser-Induced Plasma by Electromagnetic Fields // // Physics of Plasmas 1998. Vol. 5, P. 385-389.

<https://doi.org/0.1063/1.872721>

A2. Жидков А.Г. Моделирование экстракции ионов из лазерной плазмы // Физика плазмы. 1998. Том. 24, стр.1051-1055

A3. Zhidkov A.G. Simulation of the Electron Runaway in a Plasma by Langevin Equation // Physics of Plasmas. 1998. Vol. 5, P. 541-549.

<https://doi.org/10.1063/1.872737>

A4. Zhidkov A., Sasaki A., Hybrid Particle-in-Cell (PIC) Simulation of Heat Transfer and Ionization Balance in Overdense Plasmas Irradiated by Subpicosecond Pulse Laser, // JAERI-Research 98-068, 1998. Japan Atomic Energy Research Institute.

A5. Zhidkov A., Sasaki A. Subpicosecond Laser Absorption by an Overdense Plasma with Variable Ionization // Physical Review E. 1999. Vol. 59, P. 7085.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.7085>

A6. Zhidkov A., Sasaki A., Tajima T., Auguste T., D'Oliviera P., Hulin S., Monot P., Faenov A. Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Direct Spectroscopic Observation of Multiple-Charged-Ion Acceleration by an Intense Femtosecond Pulse Laser // Physical Review E. 1999. Vol. 60, P. 3273 (8 pages). DOI: 10.1103/physreve.60.3273

A7. Zhidkov A., Sasaki A., Tajima T., Energetic-Multiple-Charged-ion Sources on

Short-Laser-Pulse Irradiated Foils // Review of Scientific Instruments. 2000. Vol. 71, P. 931-934. <https://doi.org/10.1063/1.1150349>

A8. Zhidkov A., Sasaki A. Effect of Field Ionization on Interaction of an Intense Subpicosecond Laser Pulse with Foils // Physics of Plasmas. 2000, Vol.7, P. 1341-1344. <https://doi.org/10.1063/1.873775>

A9. Zhidkov A., Sasaki A., Tajima T., Emission of MeV Multiple-Charged Ions from a Metallic Foil Irradiated with an Ultrashort Laser Pulse // Physical Review E. 2000. Vol. 61, P. R2224 (R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.R2224>

A10. Zhidkov A., Zhigilei L.V., Sasaki A., Tajima T., Short-Laser-Pulse-Driven Emission of Energetic Ion into a Solid Target from a Surface Spalled by a Laser Prepulse // Applied Physics A. 2001. Vol. 73, P. 741-747.

<https://doi.org/10.1007/s003390100887>

A11. Moribayashi K., Sasaki A., Zhidkov A., Productions of Hollow Atoms from Solids Irradiated by High Intensity Laser // Physica Scripta. 2001. Vol. T92, P. 185-187. DOI 10.1238/Physica.Topical.092a00185

A12. Auguste T., Faenov A.Ya., Fukumoto I., Hulin S., Magunov A.I., Monot P., D'Oliviera P., Pikuz T.A., Sasaki A., Sharkov B.Ya., Skobelev I.Yu., Tajima T., Zhidkov A.G., Observation of MeV Ions and Hot Electrons Accelerated by a 65 fs Laser Pulse // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2001. Vol.71, P. 147-156. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(01)00064-4)

A13. Zhidkov A., Sasaki A., Fukumoto I., Tajima T., Auguste T., D'Oliveira P., Hulin S., P. Monot P., Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Pulse Duration Effect on the Distribution of Energetic Particles Produced by Intense Femtosecond Laser Pulses Irradiating Solids // Physics of Plasmas. 2001. Vol. 8, P. 3718-3723. DOI: 10.1063/1.1383026

A14. Andreev A., Zhidkov A., Sasaki A., Platonov K., Effect of Plasma Inhomogeneity on Ion Acceleration when an Ultra Intense Laser Pulse Interacts with a Foil Target // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2002. Vol. 44, N. 7, P. 1243. DOI 10.1088/0741-3335/44/7/313

- A15. Andreev A., Zhidkov A., Uesaka M., Kinoshita K., Platonov K., Scattered Light Diagnostics of Overdense Plasma Cavity in Solid Targets Irradiated by an Ultraintense Laser Pulse // Physical Review E. 2002. Vol. 66, P. 036405.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.036405>
- A16. Zhidkov A., Uesaka M., Sasaki A., Daido H., Ion Acceleration in a Solitary Wave by an Intense Picosecond Laser Pulse // Physical Review Letters. 2002. Vol. 89, P. 215002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.215002>
- A17. Zhidkov A., Koga J., Sasaki A., Uesaka M., Radiation Damping Effects on the Interaction of Ultra-intense Laser Pulses with an Overdense Plasma // Physical Review Letters. 2002. Vol. 88, P. 185002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.185002>
- A18. Hosokai T., Kinoshita K., Zhidkov A., Nakamura K., Watanabe T., Ueda T., Kotaki H., Kando M., Nakajima K., Uesaka M., Effect of a Laser Prepulse on a Narrow-Cone Ejection of MeV Electrons from a Gas Jet Irradiated by an Ultrashort Laser Pulse // Physical Review E. 2003. Vol. 67, P. 036407 (8 pages).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.036407>
- A19. Matsukado K., Esirkepov T., Kinoshita K., Daido H., Utsumi T., Li Z., Fukumi A., Hayashi Y., Orimo S., Nishiuchi M., Bulanov S.V., Tajima T., Noda A., Iwashita Y., Shirai T., Takeuchi T., Nakamura S., Yamazaki A., Ikegami M., Mihara T., Morita A., Uesaka M., Yoshii K., Watanabe T., Hosokai T., Zhidkov A., Ogata A., Wada Y., Kubota T., Energetic Protons from a Few-Micron Metallic Foil Evaporated by an Intense Laser Pulse, // Physical Review Letters. 2003. Vol. 91, P. 215001. DOI:
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.215001>
- A20. Zhidkov A., Koga J., Hosokai T., Kinoshita K., Uesaka M., Effect of Plasma Density on Relativistic Self-injection for Electron Laser Wake-Field Acceleration // Physics of Plasmas. 2004. Vol.11, P. 5379-5386. <https://doi.org/10.1063/1.1807849>
- A21. Hosokai T., Kinoshita K., Zhidkov A., Nakamura K., Kotaki H., Kando M., Nakajima K., Uesaka M., Refraction Effects on the Cavity Formation and

- Interaction of an Ultra-Short Laser Pulse with a Gas-Jet // *Physics of Plasmas*. 2004. Vol. 11, P. L57-L60. <https://doi.org/10.1063/1.1781623>
- A22. Kinoshita K., Zhidkov A., Hosokai T., Ohkubo T., Uesaka M., Propagation of an Intense Femtosecond Laser Pulse through a Thin Foil Filter // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 84, P. 4623-4625. <https://doi.org/10.1063/1.1758296>
- A23. Zhidkov A., Koga J., Esirkepov T., Hosokai T., Uesaka M., Tajima T., Optical-Field-Ionization Effects on the Propagation of an Ultra-Intense Laser Pulse in High-Z Gas Jets // *Physical Review E*. 2004. Vol. 69, P. 066408. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066408>
- A24. Zhidkov A., Koga J., Kinoshita K., Uesaka M., Effect of Self-injection on Ultra-Intense Laser Wake-Field Acceleration // *Physical Review E*. 2004. Vol. 69 P. 035401(R) (4 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.035401>
- A25. Ohkubo T., Kinoshita K., Zhidkov A., Hosokai T., Kanegae Y., Uesaka M., Efficiency of Laser Plasma K-alpha Emission for Time-Resolved X-ray Imaging // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 43, P.1608-1611
- A26. Koga J., Zhidkov A., Sasaki A., Uesaka M, Effects of Radiation Damping on Charged Particle Motion in the Field of a Strong Electromagnetic Wave // *Fusion Science and Technology*. 2004. Vol. 1, P.237-241
- A27. Uesaka M., Sakumi A., Hosokai T., Kinoshita K., Yamaoka N., Zhidkov A., Ohkubo T., Ueda T., Muroya Y., Katsumura Y., Iijima H., Tomizawa H., Kumagai N., New Accelerators for Femtosecond Beam Pump-and-Probe Analysis // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interaction with Materials and Atoms*. 2005. Vol. 241, P. 880-884.
- A28. Kando M., Masuda S., Zhidkov A., Yamazaki A., Kotaki H., Kondo S., Homma T., Kanazawa S., Nakajima K., Hayashi Y., Mori M., Kiriya H., Akahane Y., Inoue N., Ueda H., Hakai Y., Tsuji K., Yamamoto Y., Yamakawa K., Koga J., Hosokai T., Uesaka M., Tajima T., Electron Acceleration by a Nonlinear Wake Field Generated by Ultrashort (23-fs) High-Peak-Power Laser Pulses in Plasma // *Physical Review E*. 2005. Vol. 71, P. 015403(R) (4 pages).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.015403>

A29. Hosokai T., Kinoshita K., Ohkubo T., Maekawa A., Uesaka M., Zhidkov A., Yamazaki A., Kotaki H., Kando M., Nakajima K., Bulanov S.V., Tomassini P., Giulietti A., Giulietti D., Observation of Strong Correlation Between Quasi-Mono-Energetic Electron Beam Generation by Laser Wake Field and Laser Guiding Inside a Preplasma Cavity // Physical Review E. 2006. Vol. 73, P.036407.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036407>

A30. Kinoshita K., Hosokai T., Zhidkov A., Ohkubo T., Yamaoka N., Maekawa A., Uesaka M., Single-Shot Characterization of Electron Beams Generation by 17 TW 37 fs Laser Pulses // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45, P.2757-2761

A31. Hosokai T., Kinoshita K., Zhidkov A., Maekawa A., Yamazaki A., Effect of External Static Magnetic Field on the Emittance and Total Charge of Electron Beams Generated by Laser-Wakefield Acceleration // Physical Review Letters. 2006. Vol. 97, P. 075004. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.075004>

A32. Ohkubo T., Zhidkov A., Hosokai T., Kinoshita K., Uesaka M., Effect of Density Gradient on Short-Bunch Injection by Wave Breaking in the Laser Wake-Field Acceleration // Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13, P.033110.

<https://doi.org/10.1063/1.2181434>

A33. Ohkubo T., Bulanov S., Zhidkov A., Esirkepov T., Koga J., Uesaka M., Tajima T., Wave-Breaking Injection of Electrons to a Laser Wake Field in Plasma Channels at the Strong Focusing Regime // Physics of Plasmas. 2006. Vol. 13, P. 103101 (9 pages). <https://doi.org/10.1063/1.2357594>

A34. Kinoshita K., Hosokai T., Ohkubo T., Maekawa A., Zhidkov A., Uesaka M., Development of a Laser-Driven Cathode for Medical Application // Laser Physics. 2006. Vol. 16, P. 660-665. <https://doi.org/10.1134/S1054660X06040190>

A35. Kando M., Masuda S., Zhidkov A., Yamazaki A., Kotaki H., Kondo M., Homma T., Kanazawa S., Nakajima K., Chen L-M., Ma J., Hayashi Y., Mori M., Kiriyama H., Akahane Y., Inoue N., Ueda H., Nakai Y., Tsuji K., Yamamoto Y., Koga J., Hosokai T., Kinoshita K., Maekawa A., Uesaka M., Bulanov S.V., Esirkepov T. Zh., Yamagiwa

- M., Kimura T., Yamakawa K., Tajima T., Generation and Characterization of Electrons from a Gas Target Irradiated by High-Peak-Power Lasers // Laser Physics. 2006. Vol.16, P. 576-580. <https://doi.org/10.1134/S1054660X06040074>
- A36. Maekawa A., Tsujii R., Kinoshita K., Atsushi Y., Kobayashi K., Uesaka M., Shibata Y., Kondo Y., Ohkubo T., Hosokai T., Zhidkov A., Takahashi T., Ultra Short Electron Beam Bunches from a Laser Plasma Cathode // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007. Vol. 261, P. 5-8. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.081>
- A37. Kando M., Fukuda Yu., Kotaki H., Koga J., Bulanov S.V., Tajima T., Chao A., Pitthan R., Schuler K-P., Zhidkov A.G., Nemoto K., On the Production of Flat Electron Bunches for Laser Wakefield Acceleration // Sov. JETP. 2007. Vol. 105, P. 916-926. <https://doi.org/10.1134/S1063776107110064>
- A38. Zhidkov A., Nemoto K., Nayuki T., Oishi Y.,Fuji T., Giant Electromagnetic Vortex and MeV Monoenergetic Electrons Generated by Short Laser Pulses in Underdense Plasma Near Quarter Critical Density Region // Physical Review E. 2007. Vol.76, P. 016401 (8 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.016401>
- A39. Ohkubo T., Maekawa A., Tsujii R., Hosokai T., Kinoshita K., Kobayashi K., Uesaka M., Zhidkov A., Nemoto K., Kondo Y., Shibata Y., Temporal Characteristics of Monoenergetic Electron Beams Generated by the Laser Wakefield Acceleration // Physical Review Accelerators and Beams. 2007. Vol. 10, P. 031301(6 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.031301>
- A40. Zhidkov A., Fujii T., Nemoto K., Electron Self-Injection during Interaction of Tightly Focused Few-Cycle Laser Pulses with Underdense Plasma // Physical Review E. 2008. Vol. 78, P. 036406 (11 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.036406>
- A41. Takano K., Nemoto K., Nayuki T., Oishi Y., Fujii T., Zhidkov A., Hotta E., Todoriki M., Hasegawa S., Hard X-ray Generation by Low Energy, Tightly Focused Laser Pulses // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92, P. 251502.

<https://doi.org/10.1063/1.2945283>

A42. Oguchi A., Zhidkov A., Takano K., Hotta E., Nemoto K., Nakajima K., Multiple Self-Injection in the Acceleration of Monoenergetic Electrons by a Laser Wake Field // Physics of Plasmas. 2008. Vol.15, P. 043102 (12 pages).

<https://doi.org/10.1063/1.2833593>

A43. Fujii T., Miki M., Goto N., Zhidkov A., Fukuchi T., Oishi Y., Leader Effects on Femtosecond-Laser-Filament-Triggered Discharges // Physics of Plasmas. 2008, Vol. 15, P. 013107. <https://doi.org/10.1063/1.2830647>

A44. Zhidkov A., Esirkepov T., Fujii T., Nemoto K., Koga J., Bulanov S.V., Characteristics of Light Reflected from a Dense Ionization Wave with a Tunable Velocity // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103, P. 215003. DOI:

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.215003>

A45. Esirkepov T.Z., Bulanov S.V., Zhidkov A.G., Pirozhkov A.S., Kando M., High-power Laser-Driven Source of Ultra-Short X-ray and Gamma-Ray Pulses // The European Physical Journal. 2009. Vol. D55, P. 457-463.

<https://doi.org/10.1140/epjd/e2009-00172-y>

A46. Sugiyama K., Fujii T., Miki M., Yamaguchi M., Zhidkov A., Hotta E., Nemoto K., Laser-Filament-Induced Corona Discharges and Remote Measurements of Electric Fields // Optics Letters. 2009. Vol. 34, P. 2964-2966.

<https://doi.org/10.1364/OL.34.002964>

A47. Esirkepov T.Zh., Bulanov S.V., Kando M., Pirozhkov A.S., Zhidkov A.G., Boosted High-Harmonics Pulse from a Double-Sided Relativistic Mirror // Physical Review Letters 2009, Vol. 103, P. 025002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.025002>

A48. Zhidkov A., Koga J., Hosokai T., Fujii T., Oishi Y., Nemoto K., Kodama R., Characterization of Electron Self-injection in Laser Wake Field Acceleration due to the Parametric Resonance // Physics of Plasmas. 2010. Vol. 17, P. 083101 (6 pages).

<https://doi.org/10.1063/1.3458669>

A49. Oishi Y., Nayuki T., Nakajima C., Fujii T., Zhidkov A., Nemoto K.,

An X-ray Imaging System for Hard-to-Reach Facility Diagnosis Using Femtosecond Laser-Plasma // Japanese Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 49, P. 046602.
DOI 10.1143/JJAP.49.046602

A50. Sugiyama K., Fujii T., Miki M., Zhidkov A., Yamaguchi M., Hotta E., Nemoto K., Submicrosecond Laser-Filament-Assisted Corona Bursts near a High-Voltage Electrode // Physics of Plasmas. 2010. Vol. 17, P. 043108.

<https://doi.org/10.1063/1.3299389>

A51. Hosokai T., Zhidkov A., Yamazaki A., Mizuta Y., Uesaka M., Kodama R., Electron Energy Boosting in Laser-Wake-Field Acceleration with External Magnetic Field B1T and Laser Prepulses // Applied Physics Letters. 2010. Vol. 96, P. 121501 (3 pages). <https://doi.org/10.1063/1.3371709>

A52. Bulanov S.V., Esirkepov T.Zh., Hayashi Y., Kando M., Kiriyaama, Koga J.K., Kondo K., Kotaki H., Pirozhkov A.S., Bulanov S.S., Zhidkov A.G., Chen P., Neely D., Kato Y., Narozhny N.B., Korn G., On the Design of Experiments for the Study of Extreme Field Limits in the Interaction of Laser with Ultrarelativistic Electron Beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2011. Vol. 660, P. 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.029>

A53. Bulanov S.V., Esirkepov T.Zh., Hayashi Y., Kando M., Kiriyaama H., Koga J.K., Kondo K., Kotaki H., Pirozhkov A.S., Bulanov S.S., Zhidkov A.G., Rosanov N.N., Chen P., Neely D., Kato Y., Narozhny N.B., Korn G., Extreme Field Science // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2011. Vol. 53, P. 124025 (13 pages).

<http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/53/12/124025>

A54. Oishi Y., Nayuki T., Zhidkov A., Fujii T., Nemoto K., Evaluation of Yields of γ -Rays Produced by Electrons from Gas Jets Irradiated by Low-Energy Laser Pulses: Towards 'Virtual Radioisotopes' // Japanese Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 50, P. 042702. DOI 10.1143/JJAP.50.042702

A55. Mizuta Y., Hosokai T., Masuda S., Zhidkov A., Makito K., Nakanii N., Kajino S., Nishida A., Kando M., Mori M., Kotaki H., Hayashi Y., Bulanov S.V., Kodama R., Splash Plasma Channels Produced by Picosecond Laser Pulses in Argon Gas for Laser

Wakefield Acceleration // Physical Review Accelerators and Beams. 2012, Vol.15, P. 121301 (10 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.15.121301>

A56. Makito K., Zhidkov A., Hosokai T., Shin J-H., Masuda S., Kodama R., Ionization Effects in the Generation of Wake-fields by Ultra-high Contrast Femtosecond Laser Pulses in Argon Gas // Physics of Plasmas. 2012. Vol. 19, P. 103104. <https://doi.org/10.1063/1.4757976>

A57. Eto S., Zhidkov A., Oishi Y., Miki M., Fujii T., Quenching Electron Runaway in Positive High-Voltage-impulse Discharges in Air by Laser Filaments // Optics Letters. 2012. Vol. 37, P. 1130-1132. <https://doi.org/10.1364/OL.37.001130>

A58. Shin J-H., Zhidkov A., Jin Z., Hosokai T., Kodama R., Non-linear Plasma Effects on Laser-Induced Terahertz Emission from the Atmosphere // Physics of Plasmas 2012. Vol. 19, P. 023117. <https://doi.org/10.1063/1.3685736>

A59. Bulanov S.S, Maksimchuk A., Schroeder C.B., Zhidkov A.G., Esarey E., Leemans W.P., Relativistic Spherical Plasma Waves // Physics of Plasmas. 2012. Vol. 19, P. 020702. <https://doi.org/10.1063/1.3683001>

A60. Bulanov S.V., Esirkepov T.Zh., Kando M., Koga J.K., Hosokai T., Zhidkov A.G., Kodama R., Nonlinear Plasma Wave in Magnetized Plasmas // Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20, P. 083113. <https://doi.org/10.1063/1.4817949>

A61. Colgan J., Abdallah Jr J., Faenov A.Ya., Pikuz S.A., Wagenaars E., Booth N., Culfa O., Dance R.J, Evans R.G., Gray, Kaempfer, Lancaster K.L., McKenna P., Rossall A.L., Skobelev I.Yu., Schulze K.S., Uschmann I., Zhidkov A.G., Woolsey N.C., Exotic Dense-Matter States Pumped by a Relativistic Laser Plasma in the Radiation-Dominated Regime // Physical Review Letters. 2013. Vol.110, P. 125001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.125001>

A62. Zhidkov A., Masuda S., Bulanov S.S., Koga J., Hosokai T., Kodama R., Radiation Reaction Effects in Cascade Scattering of Intense, Tightly Focused Laser Pulses by Relativistic Electrons: Classical Approach // Physical Review Accelerators and Beams. 2014. Vol. 17, P. 054001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.17.054001>

- A63. Shin J., Zhidkov A., Jin Z., Hosokai T., Kodama R., Mode-Selective Terahertz Emission from Rippled Air Irradiated by Femtosecond Laser Pulses // *Applied Physics Express*. 2014. Vol. 7, P. 046202. DOI 10.7567/APEX.7.046202
- A64. Hansen S.B., Colgan J., Faenov A.Ya., Abdallah Jr J., Pikuz Jr S.A., Skobelev I.Yu., Wagenaars E., Booth N., Culfa O., Dance R.J., Tallents G.J., Evans R.G., Gray R.J., Kaempfer T., Lancaster K.L., McKenna P., Rossall A.K., Schulze K.S., Uschmann I., Zhidkov A.G., Woolsey N.C., Detailed Analysis of Hollow Ions Spectra from Dense Matter Pumped by X-ray Emission of Relativistic Laser Plasma // *Physics of Plasmas*. 2014. Vol. 21, P. 031213. <https://doi.org/10.1063/1.486522>
- A65. Fujii T., Zhidkov A., Miki M., Sugiyama K., Goto N., Eto S., Oishi Y., Hotta E., Nemoto K., Dynamics and Kinetics of Laser-Filament Plasma in Strong External Electric Field // *Chinese Journal of Physics*. 2014. Vol. 52, P. 440-464. DOI: 10.6122/CJP.52.440
- A66. Oks E., Dalimier E., Faenov A., Pikuz T., Fukuda Y., Andreev A., Koga J., Sakaki H., Kotaki H., Pirozhkov A., Hayashi Y., Skobelev I., Pikuz S., Kawachi T., Kando M., Kondo K., Zhidkov A., Kodama R., Revealing the Second Harmonic Generation in a Femtosecond Laser-Driven Cluster-Based Plasma by Analyzing Shapes of Ar XVII Spectral Lines // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, Issue 25, P. 31991-32005. <https://doi.org/10.1364/OE.23.031991>
- A67. Faenov A.Ya., Colgan J., Hansen S.B., Zhidkov A., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Abdallah J., Sakaki H., Sagisaka A., Pirozhkov A.S., Ogura K., Fukuda Y., Kanasaki M., Hasegawa N., Nishikino M., Kando M., Watanabe Y., Kawachi T., Masuda S., Hosokai T., Kodama R., Kondo K., Nonlinear Increase of X-ray Intensities from Thin Foils Irradiated with a 200 TW Femtosecond Laser // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5, P. 13436. <https://doi.org/10.1038/srep13436>
- A68. Nakanii N., Hosokai T., Iwasa K., Masuda S., Zhidkov A., Pathak N.,

Nakahara H., Mizuta Y., Takeguchi N., Kodama R., Transient Magnetized Plasma as an Optical Element for High Power Laser Pulses // *Physical Review Accelerators and Beams*. 2015. Vol. 18, P. 021303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.18.021303>

A69. Nakanii N., Hosokai T., Pathak N.C., Masuda S., Zhidkov A.G., Nakahara H., Iwasa K., Mizuta Y., Takeguchi N., Otsuka T., Sueda K., Ogino J., Nakamura H., Mori M., Kando M., Kodama R., Decomposition of Powerful Axisymmetrically Polarized Laser Pulses in Underdense Plasma // *Physical Review E*. 2016. Vol. 94, P. 063205 (6 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.063205>

A70. Pathak N., Zhidkov A., Masuda S., Hosokai T., Kodama R., Effect of Halo on High Power Laser Pulse Wake in Underdense Plasma // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, P. 113106 (8 pages). <https://doi.org/10.1063/1.4968240>

A71. Colgan J., Faenov A.Ya., Pikuz S.A., Tubman E., Butler N.M.H., Abdallah Jr J., Dance R.J., Pikuz T.A., Skobelev I.Y., Alkhimova M.A., Booth N., Green J., Gregory C., Andreev A., Lotzsch R., Uschmann I., Zhidkov A., Kodama R., McKenna P., Woolsey N., Evidence of High-n Hollow-ion Emission from Si Ions Pumped by Ultraintense X-rays from Relativistic Laser Plasma // *EPL (Europhysics Letters)*. 2016. Vol. 114, N.3, P. 35001. DOI 10.1209/0295-5075/114/35001

A72. Pathak N., Zhidkov A., Nakanii N., Masuda S., Hosokai T., Kodama R., Breaking Symmetry in Propagation of Radially and Azimuthally Polarized High Power Laser Pulses in Underdense Plasma // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, P. 033102 (8 pages). <https://doi.org/10.1063/1.4942942>

A73. Nakanii N., Hosokai, T. Iwasa K., Pathak N.C., Masuda S., Zhidkov A.G., Nakahara H., Takeguchi N., Mizuta Y., Otsuka T.P., Sueda K., Nakamura H., Kodama R., Effect of Halo on the Stability of Electron Bunches in Laser Wakefield Acceleration // *Europhysics Letters*. 2016. Vol.113, P. 34002 (5 pages). doi: 10.1209/0295-5075/113/ 34002

A74. Ogino J., Sueda K., Zhidkov A., Hosokai T., Kodama R., Mori M., Kando M., Few-cycle Laser System for Visualization of Electron Density Modulation in Laser Wakefield // *Reza Kenkyu*. 2017. Vol.45, P.99-103.

- A75. Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Vergunova G.A., Pikuz S.A., Skobelev I.Y., Andreev A., Zhidkov A., Kodama R., Ultra-bright KeV X-ray Source Generated by Relativistic Femtosecond Laser Pulse Interaction with Thin Foils and its Possible Application for HEDS Investigations// Laser and Particle Beams. 2017. Vol. 35, P. 450-457. <https://doi.org/10.1017/S0263034617000428>
- A76. Oks E., Dalimier E., Faenov A.YA., Angelo P., Pikuz S.A., Tubman E., Butler N.M.H., Dance R.J., Pikuz T.A., Skobelev I.Y., Alkhimova M.A., Booth N., Gregory C., Andreev A., Zhidkov A., Kodama R., McKenna P., Woolsey N., Using X-ray Spectroscopy of Relativistic Laser Plasma Interaction to Reveal Parametric Decay Instabilities: a Modeling Tool for Astrophysics // Optics Express. 2017. Vol. 25, Issue 3, P. 1958- 1972. <https://doi.org/10.1364/OE.25.001958>
- A77. Sakai Y., Pathak N., Jin Z., Zhidkov A., Sueda K., Toran H., Tanizawa Y., Otsuka T., Ogino J., Nakamura H., Kodama R., Hosokai T., Narrow Band and Energy Selectable Plasma Cathode for Multistage Laser Wakefield Acceleration // Physical Review Accelerators and Beams 2018. Vol. 21, P. 101301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.101301>
- A78. Yano M., Zhidkov A., Hosokai T., Kodama R., Possibility for Observing Hawking-like Effects via the Interaction of Multi-PW Class Laser Pulses with Underdense Plasmas // Physics of Plasmas. 2018. Vol.25, P. 103104. <https://doi.org/10.1063/1.5028535>
- A79. Oumbarek Espinos D., Zhidkov A., Kodama R., Langevin Equation for Coulomb Collision in Non-Maxwellian Plasmas // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25, P. 072307. <https://doi.org/10.1063/1.5025743>
- A80. Pathak N., Zhidkov A., Hosokai T., Kodama R., Spectral Effects in the Propagation of Chirped Laser Pulses in Uniform Underdense Plasma // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25, P. 013119 (11 pages). <https://doi.org/10.1063/1.5011081>
- A81. Jin Z., Nakamura H., Pathak N., Sakai Y., Zhidkov A., Sueda K., Kodama R., Hosokai T., Coupling Effects in Multistage Laser Wake-field Acceleration of

- Electrons // Scientific Reports. 2019. Vol. 9, P. 20045 (7 pages), <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56654-x>
- A82. Yano M., Zhidkov A., Koga J.K., Hosokai T., Kodama R., Effects of hole-boring and relativistic transparency on particle acceleration in overdense plasma irradiated by short multi-PW laser pulses // Physics of Plasmas. 2019. Vol. 26, P. 093108. <https://doi.org/10.1063/1.5120068>
- A83. Yano M., Zhidkov A., Hosokai T., Kodama R., Probing Space-Time Distortion via the Interaction of Multi-PW Class Laser Pulses with Underdense Plasmas // High Energy Density Physics. 2019. Vol. 30, P. 21-28. DOI: 10.1016/j.hedp.2018.12.001
- A84. Zhidkov A., Pathak N., Koga J.K., Huang K., Kando M., Hosokai T., Characterization of ionization injection in gas mixtures irradiated by subpetawatt class laser pulses // Physical Review Research. 2020. Vol. 2, P. 013216 (12 pages). <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013216>
- A85. Pathak N., Zhidkov A., Sakai Y., Jin Z., Hosokai T., Charge coupling in multi-stage laser wakefield acceleration // Physics of Plasmas. 2020. Vol.27, P. 033106 (13 pages). <https://doi.org/10.1063/1.5138671>
- A86. Pathak N., Zhidkov A., Hosokai T., Electron beam chirp dexterity in staging laser wakefield acceleration // Physics of Plasmas. 2021. Vol. 28, P. 053105 (10 pages). <https://doi.org/10.1063/5.0040897>
- A87. Espinos D.O., Pathak N., Zhidkov A., Hosokai T., Electron beam energy slicing performance in laser wakefield acceleration // Physics Letters A. 2022. Vol. 453, P. 128482 (5 pages). <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2022.128482>
- A88. Pathak N., Zhidkov A., Hosokai T., Effect of pulse group velocity on charge loading in laser wakefield acceleration // Physics Letters A. 2022. Vol. 425, P. 127873 (7 pages). <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127873>
- A89. Espinos D.O., Rondepierre A., Zhidkov A., Jin Z., Pathak N., Huang K., Nakanii N., Daito I., Kando M., Hosokai T., Notable improvements on LWFA through precise laser wavefront tuning // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, P. 18466, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45737-5>

- A90. Rondepierre A., Espinos D.O., Zhidkov A., Hosokai T., Propagation and focusing dependency of a laser beam with its aberration distribution: understanding of the halo induced disturbance // Optics Continuum. 2023. Vol. 2, P. 1351-1367 <https://doi.org/10.1364/OPTCON.484249>
- A91. Pathak N., Zhidkov A., Oumbarek Espinos D., Hosokai T., Focusing and reduction of correlated energy spread of chirped electron beams in passive plasma lens // Physics of Plasmas. 2023. Vol. 30, P. 063103 (10 pages). <https://doi.org/10.1063/5.0145693>
- A92. Lei Z., Jin Z., Zhidkov A., Pathak N., Mizuta Y., Huang K., Nakanii N., Daito I., Kando M., Hosokai T., Controllable electron self-injection in laser wakefield acceleration with asymmetric gas-jet nozzle // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2023. Vol. 3, P. 033J01 (13 pages). DOI: 10.1093/ptep/ptad030
- A93. Lei Z., Jin Z., Gu Y., Sato S., Zhidkov A., Rondepierre A., Huang K., Nakanii N., Daito I., Kando M., Hosokai T., Modular supersonic nozzle for the stable laser-driven electron acceleration // Review of Scientific Instruments. 2024. Vol. 95, P. 0115111, doi: 10.1063/5.0181414
- A94. Rondepierre A., Zhidkov A., Oumbarek Espinos D., Hosokai T., Stabilization and correction of aberrated laser beams via plasma channeling // Scientific Reports. 2024. Vol. 14, N.1, P. 12078, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62997-x>
- A95. Oumbarek Espinos D., Zhidkov A., Rondepierre A., Tawada M., Masuzawa M., Relativistic reference frame PIC simulations for electron beam dynamics with meter-scale propagation inside plasma and under external fields//arXiv:2411.04703 (2024); First steps on plasma beam prebuncher for free electron lasers through more suitable relativistic reference-frame-based particle-in-cell tools, //Physical Review Accelerators and Beams. 2025.
- A96. A. Zhidkov, A. Sasaki, T. Utsumi, I. Fukumoto, T. Tajima, F. Saito, Y. Hironaka, K. G. Nakamura, K. Kondo, M. Yoshida, Prepulse effects on the interaction of intense femtosecond laser pulses with high-Z solids, // Physical Review E. 2000. Vol. 62, P. 7232. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.7232>

A97 Zh. Lei, Y. Gu, Zh. Jin, S. Sato, A. Zhidkov, A. Rondepierre, K. Huang, N. Nakanii, I. Daito, M. Kando, T. Hosokai, Supersonic gas jet stabilization in laser-plasma acceleration // High Power Laser Science and Engineering. 2023. Vol. 11: e91 (8 pages). doi:10.1017/hpl.2023.82

A98. Yano M., Zhidkov A., Hosokai T., Kodama R., Possibility for Observing Hawking-like Effects via the Interaction of Multi-PW Class Laser Pulses with Underdense Plasmas // Physics of Plasmas. 2018. Vol.25, P. 103104.
<https://doi.org/10.1063/1.5028535>

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Strickland, G. Mourou, Compression of amplified chirped optical pulses, //Optic Communication. 1985. Vol.55, P.447-449,
[https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90151-8)
2. F. Wu, X. Liu, Z. Zhang et al., Dispersion management for 100 PW level laser using mismatch-grating compressor, // High Power Laser Science and Engineering. 2022. Vol. 10, P. 06000e38, DOI: 10.1-12.10.101/hpl2022.29
3. Z. Gan, L. Yu, C. Wang, et al. The Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility (SULF) Project // Progress in Ultrafast Intense Laser Science. 2021. Vol. XVI, P. 199-217, DOI: 10.1007/978-3-030-75089-3_10
4. <https://www.asso-alp.fr/petal/>
5. <https://www.eli-beams.eu/>
6. Ч. Бэдсал, А. Ленгдон, Физика плазмы и численное моделирование, (М. Энергоатомиздат). 1989. 455 стр.
7. T. Tajima, Computational Plasma Physics: With Applications to Fusion and Astrophysics (Addison-Wesley). 1989. 503 P.
<https://doi.org/10.1201/9780429501470>
8. Yu. N. Grigoryev, V. A. Vshivkov, M. P. Fedoruk, Numerical Particle-in-Cell Methods: Theory and Applications, (Walter de Gruyter). 2002. 252 P

9. J. Villasenor, O. Buneman, Rigorous charge conservation for local electromagnetic field solvers, // Computer Phys. Com. 1992. Vol. 69, P. 306-316
10. R.A. Fonseca, L. O. Silva, F. S. Tsung, V. K. Decyk, W. Lu, C. Ren, W. B. Mori, S. Deng, S. Lee, T. Katsouleas, J. C. Adam, OSIRIS: A Three-Dimensional, Fully Relativistic Particle in Cell Code for Modeling Plasma Based Accelerators. //Sloot, P.M.A., Hoekstra, A.G., Tan, C.J.K., Dongarra, J.J. Computational Science — ICCS 2002. ICCS 2002. Lecture Notes in Computer Science (Springer, Berlin, Heidelberg). 2002. Vol. 2331. P. 342-351, https://doi.org/10.1007/3-540-47789-6_36
11. P. Gibbon, Short pulse laser interaction with matter: an introduction (Imperial Colledge Press) 2005, 328 P., <https://doi.org/10.1142/p116>
12. A.A. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, Optics in the relativistic regime, // Rev. Mod. Phys. 2006. Vol.78, P. 309
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.309>
13. H. Kiriya, Y. Miyasaka, M. Nishiuchi, A. Kon et al., Laser Output Performance and Temporal Quality Enhancement at the J-KAREN-P Petawatt Laser Facility, //Photonics. 2023. Vol. 10, P. 997,
<https://doi.org/10.3390/photonics10090997>
14. А. В. Коржиманов, А. А. Гоносков, Е. А. Хазанов, А. М. Сергеев, УФН. 2011. Том. 181, стр. 9-32; DOI: 10.3367/UFNr.0181.201101c.0009
15. C. Danson, D. Hilliera, N. Hopps, D. Neely, Petawatt class lasers worldwide, // High Power Laser Science and Engineering. 2015. Vol. 3, P.010000e3. DOI: 10.1017/hpl.2014.52
16. S. Corde, K. Ta Phuoc, G. Lambert, R. Fitour, V. Malka, A. Rousse, A. Beck, E. Lefebvre, Femtosecond x rays from laser-plasma accelerators, //Rev. Mod. Phys. 2013. Vol.85, P. 1, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.1>
17. H. Schworer, Generation of X-Rays by Intense Femtosecond Lasers. // In: F. Dausinger, H. Lubatschowski, F. Lichtner,(eds) Femtosecond Technology for

- Technical and Medical Applications. Topics in Applied Physics,.(2004, Springer, Berlin, Heidelberg). Vol. 96, P. 235-254,
doi.org/10.1007/978-3-540-39848-6_17
18. T.Zh. Esirkepov, Exact charge conservation scheme for Particle-in-Cell simulation with an arbitrary form-factor, //Computer Physics Commun. 2001. Vol. 135, P.144-153
 19. B.B. Godfrey, J.-L. Vay, Improved numerical Cherenkov instability suppression in the generalized PSTD PIC algorithm Computer Phys. Communication. 2015. Vol.196, P.221-225
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2015.06.008>
 20. A. Pukhov, X-dispersionless Maxwell solver for plasma-based particle acceleration, //Journal Computational Physics. 2020. Vol. 418, P. 109622,
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.109622>
 21. Б.А. Трубников, Столкновения частиц в полностью ионизованной плазме, // Вопросы теории плазмы (под редакцией М.А. Леонтовича). 1965. Том.1, стр. 95
 22. М.Ф. Иванов, В.Ф. Швец, Об одном подходе к моделированию плазмы со столкновениями методом частиц, //Доклады Акад. Наук СССР. 1978. Том 238, стр. 1324-1327
 23. В.П. Силин, Введение в кинетическую теорию газов, //(Изд.3, М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ"). 2013. 344 стр.
 24. А. В. Гуревич, К теории убегающих электронов, // ЖЭТФ. 1960. Том.39, стр. 1296-1308
 25. R. M. Kulsrud , Y.-C. Sun, N. K. Winsor, H. A. Fallon, Runaway Electrons in a Plasma, //Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 31, P. 690,
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.31.690>

26. R. H. Cohen, Runaway electrons in an impure plasma, //Physics of Fluids. 1976. Vol. 19, P. 239-244, DOI : 10.1063/1.861451
27. Л.В. Келдыш, Ионизация в поле сильной электромагнитной волны, //ЖЭТФ. 1964. Том.47, стр. 1945-1957
28. Н.Б. Делоне, В.П. Крайнов, Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов в поле лазерного излучения. //УФН 1998. Том. 168, стр. 531-549 <https://doi.org/10.3367/UFNr.0168.199805c.0531>
29. H. Kiriya, Y. Miyasaka, M. Nishiuchi, A. Kon, Photonics 10 (2023) 997
30. D. Kawahito, Y. Kishimoto, Ionization and acceleration of multiply charged gold ions in solid film irradiated by high intensity laser, // Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27, P. 033108 <https://doi.org/10.1063/1.5140493>
31. В.И. Держиев, А.Г. Жидков, С.И. Яковленко, Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. 1986. (М. Энергоатомиздат.)
32. H. Daido, M. Nishiuchi, A. Pirozhkov, Review of laser-driven ion sources and their applications, //Rep. Prog. Phys. 2012. Vol. 75, P. 056401,
33. DOI 10.1088/0034-4885/75/5/056401
34. M. Hegelich, S. Karsh, S. Pletsler et al., Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89, P. 085002 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.085002>
35. В.И. Семенова, Отражение электромагнитных волн от ионизационного фронта, // Известия ВУЗов, Радиофизика. 1967. Том. 10, стр.1077-1086
36. M. Lampe, E. Ott, J. H. Walker, Interaction of electromagnetic waves with a moving ionization front, // Phys. Fluids. 1978. Vol. 21, P. 42-54, DOI: 10.1063/1.862069 42
36. А.И. Никишов, В. И. Ритус, Квантовые процессы в поле плоской волны и постоянном поле, // ЖЭТФ. 1964. Том. 19, Стр. 529 и 1191

37. N. B. Narozhny, S. S. Bulanov, V. D. Mur, V. S. Popov, e-e+pair production by a focused laser pulse in vacuum, // Phys. Lett. A. 2004. Vol. 330, P. 1-6,
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.07.013>
38. I. V. Sokolov, N. M. Naumova, J. A. Nees, G. A. Mourou, // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 105, P. 195005, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.195005>
39. S. S. Bulanov, C. B. Schroeder, E. Esarey, W. P. Leemans, Electromagnetic cascade in high-energy electron, positron, and photon interactions with intense laser pulses, //Phys. Rev. A. 2013. Vol. 87, P. 062110,
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.87.062110>
40. T. Tajima, J. M. Dawson, Laser Electron Accelerator, //Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43, P. 267 , <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.43.267>
41. E. Esarey, S. K. Ride, and P. Sprangle, Nonlinear Thomson scattering of intense laser pulses from beams and plasmas, //Phys. Rev. E. 1993. Vol. 48, P.3003
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.48.3003>