

На правах рукописи

УДК 537.5



Гец Артем Викторович

**Динамика взаимодействия
ван-дер-ваальсовых атомарных
кластеров с полем сверхкоротких
лазерных импульсов**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Крайнов Владимир Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Попов Александр Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор
Астапенко Валерий Александрович

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится 26 мая 2010 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.156.01 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института.

Автореферат разослан 23 апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.156.01
кандидат физико-математических наук



Батурин А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Атомарный кластер представляет собой группу атомов, удерживаемых вместе силами межатомного взаимодействия. В настоящей работе рассматриваются большие кластеры, формирующиеся под действием ван-дер-ваальсовых сил и содержащие от нескольких тысяч до нескольких миллионов атомов. Размер таких кластеров составляет несколько десятков нанометров.

Взаимодействие пучков атомарных кластеров с интенсивными (10^{15} - 10^{20} Вт/см²) короткими (< 1 пс) лазерными импульсами с середины 90-х годов прошлого века стало одним из направлений активных исследований в физике взаимодействия излучения с веществом. Интерес к атомарным кластерам в качестве мишени для лазерных импульсов обусловлен промежуточным состоянием, которым обладает структура кластеров по сравнению с газообразными и твердотельными мишенями. С одной стороны, высокая, сравнимая с твердотельной концентрация атомов в кластере позволяет достичь при лазерном облучении больших удельных плотностей энергии в веществе. С другой, кластеры содержат сравнительно малое количество материи и изолированы в пространстве. Поэтому механизмы быстрой передачи энергии отсутствуют, и нагрев происходит в небольшом объеме, приводя к появлению горячих электронов в образующейся плазме. Эти факторы в совокупности с ультракороткой длительностью применяемых лазерных импульсов позволяют обеспечить в экспериментах очень высокую эффективность возбуждения вещества прежде, чем огромная плотность поглощенной кластером энергии приводит к его разлету.

Практическая ценность исследования взаимодействия интенсивных ультракоротких импульсов излучения с атомарными кластерами заключается в возможности получения фотонов и частиц с энергиями, значительно превышающими энергию квантов падающего импульса. В частности, кулоновский взрыв внешних слоев кластера, происходящий вслед за вылетом из кластера существенной части электронов под действием лазерного импульса, приводит к генерации быстрых многозарядных ионов.

Кластерная плазма при определенных условиях может являться эффективным и компактным источником рентгеновского излучения. Поглощение лазерного излучения кластером приводит к образованию неоднородной горячей плазмы, состоящей из многозарядных ионов и захваченных ими электронов. Дальнейшая динамика кластерной плазмы после окончания лазерного импульса создает возбужденные многозарядные ионы и другие возбуждения в плазме, ведущие в последующем к испусканию коротковолновых фотонов. При этом обеспечивается достаточно высокая энергетическая эффективность преобразования лазерного импульса в рентгеновское излучение, составляющая около 1%.

Как показали эксперименты и теоретические расчеты, кластерные пучки могут быть также эффективной средой для генерации высших гармоник лазерного излучения, лежащих в интервале от ультрафиолета до мягкого рентгеновского диапазона. При облучении

кластеров наблюдаются более высокие гармоники лазерного излучения, чем в случае газообразной среды.

Пучок дейтериевых кластеров при возбуждении ультракоротким лазерным импульсом может использоваться в качестве компактного источника быстрых нейтронов. При кулоновском взрыве полностью ионизованных дейтериевых кластеров средняя кинетическая энергия дейтронов оказывается достаточной для реакции ядерного синтеза, ведущей к образованию нейтронов.

Несмотря на существенное количество экспериментальных и теоретических работ по рассматриваемой тематике, динамика взаимодействия атомарных кластеров с полем сверхкоротких лазерных импульсов не является до конца изученной физической проблемой. Это объясняется большим разнообразием процессов, которые могут протекать в кластерах под действием лазерного излучения. Помимо этого постоянное совершенствование лазерной техники, и в частности, методов генерации интенсивных сверхкоротких импульсов позволяет исследовать их взаимодействие с кластерными пучками в новых диапазонах значений параметров эксперимента.

Нагрев свободных электронов, образующихся в ван-дер-ваальсовом кластере при ионизации атомов, за счет поглощения квантов лазерного излучения оказывает определяющее влияние на динамику системы. Помимо таких механизмов нагрева электронной подсистемы, как электрон-ионные столкновения (обратный тормозной эффект) и резонансное поглощение, также играет роль поглощение энергии лазерного импульса электронами на границе кластера и вакуума, описание которого само по себе является актуальной задачей взаимодействия лазерных импульсов с атомарными кластерами.

Скорость процессов полевой и ударной ионизации в ионизованных кластерах, представляющих собой плотную плазму, заметно меняется по сравнению со случаем изолированных атомов и ионов. Является важным оценка и учет этого эффекта при рассмотрении эволюции кластерной плазмы.

В последние годы применение лазеров на свободных электронах позволило распространить исследования взаимодействия кластерных пучков с излучением в область вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгеновского диапазона. При этом импульсы излучения имеют фемтосекундную длительность. В то же время недавние достижения в области генерации высоких гармоник лазерного излучения в газах позволяют получать в экспериментах импульсы длительностью вплоть до сотен аттосекунд. Исследование взаимодействия атомарных кластеров с субфемтосекундными и аттосекундными импульсами на сегодняшний день также является актуальной задачей.

Цель работы

Целью работы является теоретическое исследование взаимодействия ван-дер-ваальсовых атомарных кластеров с полем интенсивных фемтосекундных и аттосекундных импульсов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть различные механизмы нагрева электронов в кластерах инертных газов при облучении интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Определить области значений параметров лазерного излучения и кластеров, при которых эффективен каждый из механизмов. Исследовать механизм вакуумного нагрева электронов в кластерной плазме.
2. Изучить влияние эффектов экранировки в плотной кластерной плазме на потенциалы ионизации многозарядных атомарных ионов инертных газов. Рассмотреть влияние поля Хольцмарка атомарных ионов на уширение их основного и возбужденных состояний.
3. Исследовать угловые характеристики и энергетические спектры электронов и ионов, образующихся при разлете кластерной плазмы после воздействия ультракороткого лазерного импульса, в частности, в случае сверхвысоких интенсивностей лазерного излучения, когда кинетическая энергия электронов сравнима с энергией покоя.
4. Рассмотреть динамику ионизации атомарных кластеров Ag, Kг и Хе в поле сильного аттосекундного импульса мягкого рентгеновского излучения. Проанализировать отличия протекающих процессов по сравнению со случаем фемтосекундных лазерных импульсов.

Научная новизна работы

1. Вакуумный механизм нагрева электронов обобщен для случая больших сферических атомарных кластеров, облучаемых интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Впервые построена модель гидродинамического расширения кластера, учитывающая указанный механизм поглощения лазерной энергии кластерной плазмой, и получено ее решение в универсальном виде.
2. Впервые рассчитаны потенциалы ионизации многозарядных ионов Ag, Kг и Хе в кластерной плазме в широком диапазоне электронных температур с учетом дебаевского экранирования.
3. Получены угловые распределения релятивистских электронов, испускаемых атомарными кластерами в поле линейно-поляризованного сверхсильного фемтосекундного лазерного импульса с пиковой интенсивностью 10^{19} Вт/см².
4. Осуществлено теоретическое рассмотрение взаимодействия интенсивных импульсов излучения аттосекундной длительности с ван-дер-ваальсовыми кластерами атомов инертных элементов. Впервые продемонстрировано резонансное увеличение сечения рассеяния мягких рентгеновских лучей ксеноновыми кластерами.

Научная значимость и практическая ценность

Практическая ценность проведенных теоретических исследований связана с задачей повышения эффективности экспериментов по взаимодействию интенсивных импульсов излучения с кластерными мишенями как компактного и относительно недорогого источника высокоэнергетических электронов и ионов, жесткого рентгеновского линейчатого излучения, высоких гармоник лазерного излучения.

Результаты работы способствуют созданию целостного теоретического описания взаимодействия атомарных кластеров со сверхкороткими лазерными импульсами в различных областях значений параметров, характеризующих систему (таких, как частота, интенсивность и длительность импульса, вещество кластера и его размер), а также указывают направления дальнейших экспериментальных исследований.

Отдельно можно выделить следующие аспекты:

1. Рассчитана мощность лазерного излучения, поглощаемого кластером за счет вакуумного нагрева. Результат расчетов позволяет дополнить модели эволюции больших кластеров в гидродинамическом режиме с учетом указанного механизма нагрева, а также определить оптимальные параметры эксперимента для получения высокоэнергетичных электронов
2. Полученные в работе значения потенциалов ионизации атомов инертных газов в плотной плазме могут быть использованы для вычисления скоростей полевой и ударной ионизации, а также механизма лавинного усиления процесса ионизации под действием статического поля ионизованного кластера. Эти результаты легко пересчитываются при учете механизма гидродинамического расширения кластера.
3. Сравнение рассчитанных в диссертации угловых распределений электронов, вылетающих из кластера под действием фемтосекундного импульса, с экспериментальными данными будет способствовать восстановлению картины процесса внешней ионизации кластеров при сверхвысоких интенсивностях падающего излучения.
4. Изученные теоретически процессы ионизации высокоэнергетичными фотонами при облучении кластеров инертных элементов аттосекундными импульсами ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазона в ближайшие годы могут стать объектом экспериментальных исследований. В случае кластеров Хе предсказана возможность наблюдения резкого увеличения мощности рассеянного излучения.

Положения, выносимые на защиту

1. Вакуумный нагрев является эффективным механизмом образования горячих электронов с энергиями порядка 10 кэВ в больших атомарных кластерах, облучаемых короткими сильными лазерными импульсами (интенсивность 10^{16} - 10^{17} Вт/см², длительность – десятки фс). Поглощение лазерной энергии электронной подсистемой за счет вакуумного нагрева и расширение кластера под давлением нагретого электронного газа определяются одним безразмерным параметром (определяемым условиями эксперимента), который пропорционален скорости расширения по окончании импульса.
2. Потенциалы ионизации многозарядных атомарных ионов инертных газов в плотной кластерной плазме, рассчитанные с использованием теории возмущений с учетом дебаевского экранирования, при энергиях электронной подсистемы более 50 эВ с высокой точностью согласуются с результатами численного решения уравнения Шредингера.
3. Переход от импульсов фемтосекундной длительности к аттосекундным при взаимодействии с атомарными кластерами приводит к существенному изменению

характерной динамики процессов внутренней и внешней ионизации. В частности испускаемые электроны имеют монохроматический спектр, а их угловое распределение определяется лишь характеристиками однофотонной ионизации изолированных атомов.

4. При облучении ксеноновых кластеров излучением мягкого рентгеновского диапазона на длине волны около $\lambda = 12$ нм вследствие эффекта гигантского атомного резонанса должен наблюдаться резкий рост сечения рассеяния излучения на кластере по сравнению с аргоновыми и криптоновыми кластерами. Если радиус кластера $R \ll \lambda$, сечение рассеяния в отличие от газообразной среды пропорционально квадрату числа атомов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации доложены на следующих международных и общероссийских конференциях, симпозиумах, научных школах и семинарах:

1. XLVII, XLVIII, XLIX Научные конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Долгопрудный, 2004, 2005, 2006)
2. Научная сессия МИФИ-2005. III конференция научно-образовательного центра CRDF “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях” (Москва, 2005)
3. Зимняя студенческая школа по физике “Физика экстремальных состояний и процессов”, Российский Федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ) (Снежинск, Челябинская область, 2005)
4. VI, VII, VIII Школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, 2005, 2006, 2007)
5. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and the Conference on Lasers, Applications, and Technologies ICONO/LAT 2005, ICONO/LAT 2007 (St. Petersburg, Russia, 2005; Minsk, Belarus, 2007)
6. Ultrafast Dynamic Imaging Workshop, Imperial College (London, 2006)
7. 4th, 5th, 6th Workshops “Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation”, A.V. Prokhorov General Physics Institute (Moscow, Russia, 2006, 2007, 2008)
8. II Всероссийская конференция молодых ученых “Физика и химия высокоэнергетических систем” (Томск, 2006)
9. 15th, 17th International Laser Physics Workshops, LPHYS’06, LPHYS’08 (Lausanne, Switzerland, 2006; Trondheim, Norway, 2008)
10. V International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology” PPPT-5 (Minsk, Belarus, 2006)
11. XXXIV, XXXVI Международные конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2007, 2009)
12. Третья Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, Российский Федеральный

Ядерный Центр – ВНИИ экспериментальной физики (Саров, 2009)

13. 2nd International Conference on Attosecond Physics ATTO-09, Kansas State University (Manhattan, Kansas, USA, 2009)
14. International Conference “Light at Extreme Intensities – Scientific opportunities and technological issues of the Extreme Light Infrastructure – LEI 2009” (Brasov, Romania, 2009)
15. International Workshop “Atomic Physics 2009”, Max Plank Institute for Complex Systems (Dresden, Germany, 2009)
16. 30th International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter (Hirschegg, Austria, 2010)
17. XXIV Съезд по спектроскопии. Молодежная школа по оптике и спектроскопии (Москва-Троицк, 2010)
18. Результаты работы неоднократно были представлены на семинаре по физике многофотонных процессов в институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано более 20 работ, из них 4 статьи в рецензируемых отечественных и международных журналах, свыше 16 публикаций в трудах научных конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все оригинальные результаты диссертационной работы получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялось построение теоретических моделей, проведение расчетов в аналитической и численной форме, анализ и интерпретация полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Каждая глава имеет выводы, в которых сформулированы основные результаты по данной главе. Объем диссертации составляет 106 страниц, в том числе 51 рисунок и 6 таблиц. В конце диссертации приведен библиографический список из 113 наименований.

Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи, отмечается научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации приведен обзор существующих экспериментальных и теоретических работ, а также численного моделирования взаимодействия сверхсильных ультракоротких лазерных импульсов с атомарными кластерами. Рассмотрена типичная постановка эксперимента и методы получения пучков ван-дер-ваальсовых кластеров.

Далее анализируются основные типы процессов, имеющих место при взаимодействии лазерных импульсов с атомарными кластерами. Во-первых, это образование квазисвободных электронов внутри кластера, называемое внутренней ионизацией кластера. В исходном состоянии ван-дер-ваальсовый кластер представляет собой совокупность нейтральных атомов (например, неон Ne, аргон Ar, криптон Kr или ксенон Xe) или молекул (например, водорода H₂ и азота N₂). До взаимодействия с лазерным импульсом свободные электроны в таких кластерах отсутствуют. На переднем фронте импульса происходит полевая туннельная ионизация атомов кластера, если интенсивность лазерного импульса меньше атомной интенсивности $I_a = 3.6 \cdot 10^{16}$ Вт/см². При более высоких интенсивностях имеет место надбарьерный развал атомов и ионов. Пороговое значение электрического поля может быть оценено по правилу Бете [1]:

$$F_B = \frac{E_Z^2}{4(Z+1)}, \quad (1)$$

где Z – кратность заряда рассматриваемого иона A^{Z+} (для нейтрального атома нужно положить $Z = 0$), E_Z – его потенциал ионизации. Здесь и далее используется атомная система единиц, в которой постоянная Планка, заряд и масса электрона равны единице: $m_e = e = \hbar = 1$.

После первичной полевой ионизации атомов дальнейшая внутренняя ионизация может происходить как за счет неупругих электрон-ионных столкновений, так и внешним лазерным полем или кулоновским полем положительно заряженного кластера.

В том случае, если свободные электроны обладают достаточной кинетической энергией, чтобы преодолеть кулоновский барьер кластерного иона, они могут покинуть кластер. Этот процесс носит название внешней ионизации. Заряд Q , приобретаемый кластером радиуса R в процессе внешней ионизации под действием поля напряженности F , может быть оценен по формуле, аналогичной (1):

$$Q = 4FR^2, \quad (2)$$

Чтобы оторванный от кластера электрон не вернулся обратно через часть оптического цикла, амплитуда его колебаний в лазерном поле должна значительно превышать радиус кластера

$$F/\omega^2 \gg R, \quad (3)$$

где ω - частота лазера.

Заключительной стадией эволюции кластерной плазмы является ее разлет, который в зависимости от соотношения между интенсивностью лазера и размером кластера может происходить в двух режимах. В случае сравнительно небольших кластеров в сильном лазерном поле, для которых выполнено условие (3), все свободные электроны, появившиеся внутри кластера в процессе внутренней ионизации, быстро удаляются из него. Взаимное отталкивание ионов в положительно заряженном кластере приводит к кулоновскому взрыву.

В противоположном случае достаточно больших кластеров расширение протекает в гидродинамическом режиме. Высокий кулоновский барьер удерживает большую часть

свободных электронов в кластере, и относительный заряд кластерного иона невелик. Электронная подсистема, нагреваясь за счет поглощения энергии лазера, претерпевает расширение, увлекая за собой атомарные ионы.

В реальных экспериментах часто наблюдается промежуточный случай, когда в центре кластера формируется электронное облако, колеблющееся под действием лазерного поля. При этом положительно заряженные внешние слои кластера испытывают кулоновский взрыв. Электронейтральная центральная часть кластера расширяется в гидродинамическом режиме. В такой ситуации иногда наблюдается анизотропный разлет ионов, нехарактерный для чисто кулоновского или гидродинамического режимов.

Ключевым процессом, определяющим динамику кластерной плазмы под действием лазерного импульса, является нагрев свободных электронов за счет поглощения энергии лазерного излучения, который может осуществляться за счет нескольких различных механизмов при различных экспериментальных условиях. При низких интенсивностях лазерного излучения основным механизмом поглощения энергии является обратный тормозной эффект. При каждом электрон-ионном столкновении в среднем поглощается удвоенная пондеромоторная энергия, то есть $F^2/2\omega^2$. Резкий рост поглощаемой кластером мощности может наблюдаться на заднем фронте импульса в момент, когда при расширении кластера собственная частота колебаний для плазменного шарика - кластера (частота Ми $\omega_{Mie} = \sqrt{4\pi n_e/3}$, n_e – концентрация свободных электронов) совпадает с частотой лазера.

Однако эффективность тормозного поглощения падает с увеличением интенсивности лазера, поскольку по мере нагрева электронов быстро снижается сечение их столкновений с ионами $\sigma_{ei} \sim v_e^{-4}$, где v_e – скорость электрона. При этом средняя длина свободного пробега горячих электронов может достигать размеров кластера. В этом случае определяющую роль начинает играть поглощение электронами энергии лазера при взаимодействии с резкой границей кластер-вакуум, связанное с возникновением дефазировки между движением электрона и лазерным полем. **Вторая глава** диссертации посвящена детальному рассмотрению нагрева свободных электронов, происходящему вблизи границы кластерной плазмы и вакуума.

В работе [2] был предложен так называемый механизм вакуумного нагрева электронов для протяженной плазмы, имеющей плоскую границу. Энергия интенсивных p -поляризованных лазерных импульсов, падающих наклонно на границу плазма-вакуум, может сильно поглощаться за счет вырывания электронов в вакуум в течение части лазерного периода, ускорения в лазерном поле и последующего возвращения в плазму с энергией на величину порядка пондеромоторной энергии большей первоначальной.

В диссертации построена и исследована модификация модели вакуумного нагрева для случая больших атомарных кластеров сферической формы. Учтено гидродинамическое расширение кластера вследствие передачи энергии нагретых электронов ионному остову.

При воздействии на кластер интенсивного гауссовского лазерного импульса длительностью τ и пиковой амплитудой электрического поля F_0 : $F(t) = F_0 \exp(-t^2/\tau^2) \sin \omega t$,

все атомы кластера быстро ионизируются на переднем фронте импульса. После этого, поскольку плазменная частота в разы превышает частоту титан-сапфирового лазера, лазерный импульс уже почти не проникает в кластерную плазму.

В течение первой половины каждого оптического цикла нормальная составляющая внешнего электрического поля положительна на одной из полусфер кластера. В течение первой четверти периода по мере того, как нормальная компонента нарастает, лазерное поле вырывает свободные электроны с поверхности кластера с небольшой начальной скоростью и ускоряет их. Эти электроны движутся в вакууме под действием как электрического поля лазерного импульса, так и кулоновского поля облака других вырванных электронов и поля ионизованного кластера. Уменьшение нормальной компоненты лазерного поля во второй четверти периода приводит к тому, что вылетевшие электроны начинают возвращаться обратно в кластер с увеличенной кинетической энергией. Этот процесс продолжается до окончания текущего оптического периода, и подавляющая часть испущенных электронов снова попадает в кластер.

Как показывают расчеты, приведенные в диссертации, поглощенная одним электроном за цикл энергия составляет в среднем $\varepsilon = 3\eta F^2 / 2\omega^2$, где $\eta = 0.75$. Мощность, поглощаемая всей поверхностью кластера, составляет

$$W = \frac{27\eta R^2}{16\pi\omega} F_{env}^3(t). \quad (4)$$

Здесь $F_{env}(t) = F_0 \exp(-t^2/\tau^2)$ – огибающая лазерного импульса.

Энергия лазерного излучения, поглощаемая электронами, в дальнейшем переходит в кинетическую энергию ионов, приводя к расширению кластера, которое вследствие высоких скоростей разлета ионов представляет собой неравновесный статистический процесс. Возрастающее давление электронного газа не компенсируется внешней средой. Вычислив изменение кинетической энергии ионов расширяющегося кластера, можно записать уравнение баланса энергии электронной подсистемы $E(t)$:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{27\eta R^2}{16\pi\omega} F_0^3 \exp(-3t^2/\tau^2) - \frac{3}{5} N_a m_a \frac{dR}{dt} \frac{d^2 R}{dt^2}. \quad (5)$$

В уравнении (5) N_a и m_a – общее количество атомов в кластере и масса каждого атома.

Давление электронного газа $P_e = 2E/3V$, где V – объем кластера. Расширение кластера описывается уравнением Ньютона, которое имеет вид

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{3P_e V}{m_a N_a R}. \quad (6)$$

Уравнения (5,6) представляют собой систему, полностью описывающую поглощение энергии кластером за счет вакуумного нагрева и его расширение. Начальные должны быть выбраны в виде: $R(-\infty) = R_0$ – начальный радиус кластера; $dR/dt = 0$ при $t \rightarrow -\infty$; $E(-\infty) = 0$.

Система уравнений (5,6) может быть приведена к универсальному безразмерному виду путем следующей замены переменных:

$$R/R_0 \rightarrow R, \quad t/\tau \rightarrow t, \quad \frac{2\tau^2}{m_a N_a R_0^2} E \rightarrow E. \quad (7)$$

При этом зависимость динамики системы от условий эксперимента определяется единственным безразмерным параметром

$$s = \frac{27\eta(F_0\tau)^3}{16\pi\omega m_a N_a} \quad (8)$$

На рис.1 показан вид безразмерных функций $R(t)$ и $E(t)$, являющихся решением (5,6) для различных значений параметра s . Следует заметить, что многократная внутренняя ионизация атомов не меняет полученные результаты. Она лишь уменьшает среднюю энергию электронов.

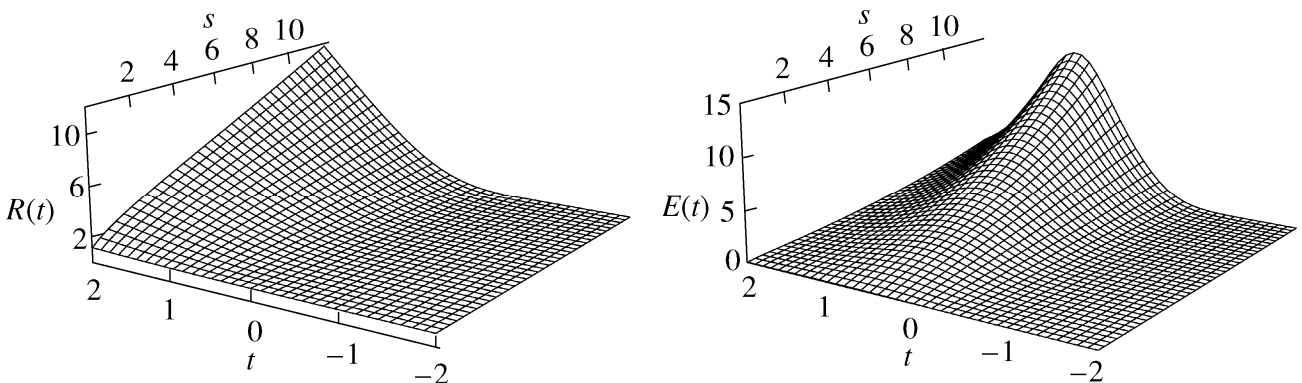


Рис. 1. Зависимость радиуса кластера $R(t)$ и энергии электронной подсистемы $E(t)$ от времени для различных значений параметра s (всё – в безразмерных единицах, см. (7,8)).

На рис. 2 представлена зависимость конечной скорости расширения кластера V_f в безразмерных единицах от значения параметра s . Видно, что эта зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией $0.8s$. Отсюда становится ясен физический смысл введенного параметра.

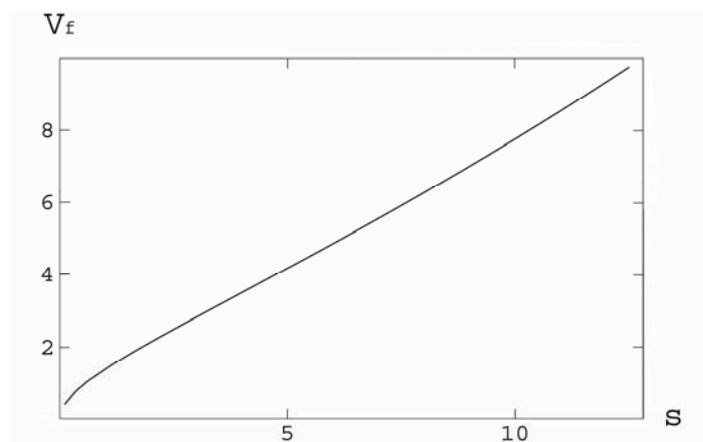


Рис. 2. Конечная скорость расширения кластера V_f в безразмерных единицах как функция параметра s , см. (8).

Сравнение предсказаний описанной модели взаимодействия атомарных кластеров с лазерными импульсами с характерными результатами экспериментов показывает хорошее количественное согласие.

В **третьей главе** диссертации рассмотрены процессы внутренней и внешней ионизации ван-дер-ваальсовых кластеров под действием сверхсильных фемтосекундных импульсов.

После первичной полевой ионизации атомов кластера на скорость внутренней ионизации кластера существенное влияние начинает оказывать наличие плотной плазмы. С одной стороны, лазерное поле слабо проникает в объем сверхкритической плазмы. С другой, свободные электроны плазмы экранируют потенциал атомных ядер, приводя к снижению энергии связи внешних электронов многозарядных ионов.

В диссертации осуществлена оценка указанного эффекта экранирования. Применяемый подход основан на численном решении одночастичного уравнения Шредингера для внешнего nl -электрона (n и l – главное и орбитальное квантовые числа) рассматриваемого атомарного иона с использованием водородоподобного приближения и метода Хартри-Фока. Для учета дебаевской экранировки в радиальном уравнении Шредингера применен потенциал Юкавы

$$V(r) = -\frac{Z_{eff}}{r} \exp\left(-\frac{r}{R_D}\right), \quad (9)$$

где R_D – радиус Дебая, определяемый известным выражением $R_D = \sqrt{T_e / (4\pi Z n_a)}$. Здесь n_a – концентрация ионов в кластере, $Z = 1, 2, 3, 4, \dots$ – кратность заряда иона. Электронная температура равна T_e , концентрация свободных электронов – $Z n_a$. Эффективный заряд ионного остова Z_{eff} , в поле которого движется внешний электрон, определяется по известным значениям потенциалов ионизации E_Z изолированных ионов согласно выражению $E_Z = Z_{eff}^2 / (2n^2)$.

Приближение идеальной плазмы справедливо, когда в дебаевской сфере количество электронов велико. Поэтому получаем ограничение для электронной температуры в виде

$$T_e > [36\pi Z n_a]^{1/3}. \quad (10)$$

Характерное значение этого ограничения составляет $T_e > 30$ эВ.

С использованием описанной методики были вычислены потенциалы ионизации ионов Ag, Kr и Xe с различной кратностью заряда в широком интервале электронных температур кластерной плазмы. На рис. 3 в качестве примера показаны потенциалы ионизации многозарядных атомарных ионов аргона как функции электронной температуры T_e . Ясно, что при высоких T_e они совпадают с соответствующими значениями E_Z для изолированных ионов. В области низких температур кривые ограничены условием (10). При этом ван-дер-ваальсовые кластеры рассматриваются как вещество в жидкой фазе с массовой плотностью 1.40 г/см^3 для Ag, что соответствует $n_a = 0.0031$ ат. ед.

Простое аналитическое выражение для потенциалов ионизации многозарядных атомарных ионов E_i можно получить, раскладывая дебаевский потенциал по степеням r/R_D при не очень малых значениях дебаевского радиуса R_D и используя теорию возмущений

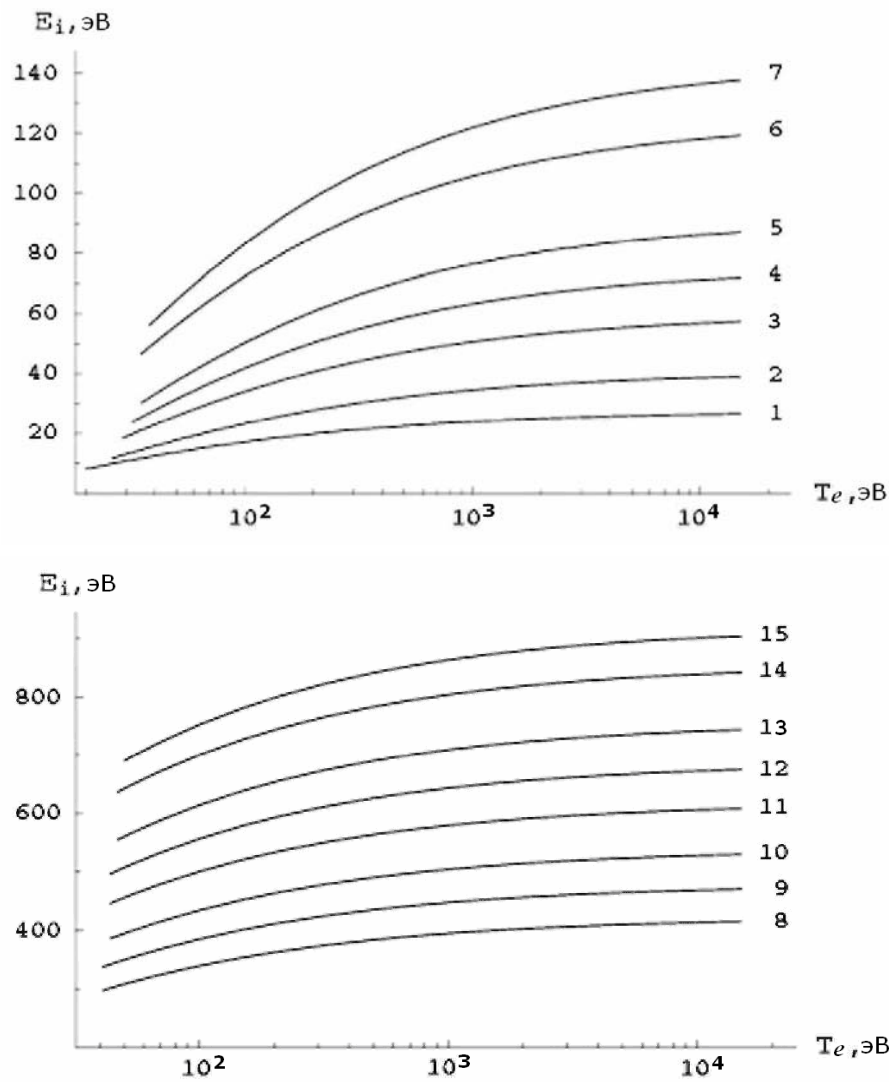


Рис. 3. Зависимость потенциалов ионизации E_i атомарных ионов Ag^{Z+} : $Z = 1-7$ и $Z = 8-15$ от электронной температуры T_e .

первого порядка с известными диагональными матричными элементами для кулоновского поля. Расчеты приводят к выражению

$$E_i = \frac{Z_{eff}^2}{2n^2} - \frac{Z_{eff}}{R_D} + \frac{1}{4R_D^2} [3n^2 - l(l+1)] - \frac{n^2}{12Z_{eff}R_D^3} [5n^2 + 1 - 3l(l+1)] \quad (11)$$

Понятно, что при $R_D \rightarrow \infty$ эти потенциалы ионизации соответствуют экспериментальным значениям для свободных ионов E_Z .

Нужно отметить, что полученные в диссертации значения потенциалов ионизации применимы и в случае расширения кластера, когда n_a снижается, при соответственном пересчете эффективной электронной температуры T_e , так как энергия связи зависит только от отношения T_e/n_a .

В отличие от электронной подсистемы, холодные ионы внутри кластера – существенно неидеальное вещество. Условие (10) для ионов не выполнено. Кулоновское микрополе окружающих ионов возмущает основное и возбужденные состояния рассматриваемого иона. Средняя величина этого поля увеличивает потенциал ионизации основного состояния, тогда

как его вариация из-за случайного расположения окружающих ионов приводит к неоднородному уширению уровней. Область действия микрополя – межатомные расстояния, что значительно меньше радиуса Дебая. Значит, дебаевское экранирование не влияет на возмущение, вносимое полем Хольцмарка.

Для оценки величины указанного эффекта воспользуемся квазистатическим приближением Хольцмарка, которое справедливо, если радиус Вайскопфа значительно больше среднего расстояния между ионами. Радиус Вайскопфа определяется как $r_w = \sqrt{\sigma_{ii}}$, где σ_{ii} – сечение упругого диполь-дипольного рассеяния ионов друг на друге. Характерная величина поля Хольцмарка [3]

$$F_H = 2\pi Z \left(\frac{4}{15} n_a \right)^{2/3}. \quad (12)$$

Например, невозмущенный потенциал ионизации для иона Xe^{7+} (одноэлектронное $5s$ -состояние) составляет $E_Z = 106$ эВ. Согласно правилу Бете (1) быстрая надбарьерная ионизация происходит, если напряженность поля превышает величину $F_B = E_Z^2 / (4(Z+1))$. В рассматриваемом примере $F_B = 0.47$ ат. ед., тогда как $F_H = 0.30$ ат. ед. Поэтому микрополе Хольцмарка не может привести к быстрой надбарьерной ионизации иона Xe^{7+} . Тем не менее, оно приводит к исчезновению возбужденных состояний иона, за исключением нижних состояний $5p$ ($J = 1/2$) с энергией 116500 см^{-1} и $5p$ ($J = 3/2$) с энергией 135000 см^{-1} .

Как уже было сказано, поле Хольцмарка приводит к штарковскому уширению атомных уровней. Для расчета этого эффекта должны быть известны поляризуемости многозарядных ионов. Кроме того, следует учитывать, что распределение Хольцмарка спадает слишком медленно при больших значениях напряженности F (как $F^{-5/2}$), поэтому среднее значение $\langle F^2 \rangle$ расходится. Причина заключается в том, что подход Хольцмарка не учитывает взаимное кулоновское отталкивание между ионами, существенное на близких расстояниях, и поэтому неприменим при больших F . Для устранения этого недостатка в литературе было предложено несколько модификаций распределения Хольцмарка.

Для простой оценки уширения можно воспользоваться выражением для поляризуемости водородоподобного атома и приближенно заменить $\langle F^2 \rangle$ на F_H^2 . Для рассматриваемого иона Xe^{7+} получаем, что хольцмарковское уширение основного состояния $\Delta E \sim r_0^3 F_H^2 \sim 15$ эВ, где величина $r_0 \sim Z/E_Z$ есть размер иона. То есть величина уширения мала по сравнению с энергией связи в основном состоянии.

В отличие от дебаевского экранирования, которое оказывается несущественным для кластеров с размером менее дебаевского радиуса, ионное микрополе необходимо учитывать и для небольших кластеров.

В работе были проанализированы также угловые и энергетические характеристики электронов и атомарных ионов, образующихся при разлете кластеров под действием лазерных импульсов. Угловые распределения электронов представляют существенный интерес, поскольку при сравнении с экспериментальными данными позволяют восстановить картину процесса внешней ионизации кластеров.

Было проведено моделирование угловых распределений электронов, испускаемых атомарными кластерами при облучении линейно-поляризованными фемтосекундными лазерными импульсами “релятивистской” напряженности, в которых характерная энергия колебаний электрона сравнима с его энергией покоя, т.е. $F^2/\omega^2 \sim c^2$. В качестве примера было рассмотрено испускание электронов ксеноновыми кластерами под действием лазерного импульса интенсивностью $I = 10^{19}$ Вт·см⁻² с учетом действия на испущенный электрон, как магнитного поля лазерного импульса, так и кулоновского поля ионизованного кластера.

На переднем фронте импульса по мере роста интенсивности происходит быстрая многократная внутренняя ионизация кластера, образуются ионы с кратностью заряда до $Z = 26$. Каждая очередная стадия ионизации происходит через 1-2 оптических цикла. Суммарное количество образующихся свободных электронов в случае кластера радиусом $R = 3$ нм составляет около $1600 \cdot 26 = 41600$. Эти электроны при указанных интенсивностях не удерживаются кулоновским барьером заряженного кластера и быстро отрываются от кластера электрическим полем лазерного импульса, поскольку выполнено условие (3). Поэтому они не оказывают существенного влияния на последующие стадии полевой внутренней ионизации. Ударной ионизацией можно пренебречь из-за высоких кинетических энергий электронов.

В системе координат с началом в центре фокального пятна, где ось X направлена вдоль вектора электрического поля \vec{F} , ось Y – вдоль вектора магнитного поля \vec{B} , ось Z – вдоль направления распространения луча, напряженность лазерного поля описывается формулой

$$F(t, x, y, z) = F_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R_f^2}\right) \sin^2\left(\frac{t - z/c}{\tau}\right) \sin \omega(t - z/c), \quad (13)$$

где R_f – радиус фокального пятна. В численных расчетах ниже использованы значения $R_f = 5$ мкм и $\omega = 1.5$ эВ (титан-сапфировый лазер).

Момент внутренней ионизации при моделировании определялся по правилу Бете (1), момент внешней ионизации t_i для i -го по счету электрона – условием $|F(t_i)| = i/R^2$. Рассматривался отрыв электронов из полюсов кластера – точек, где достигает максимума нормальная к поверхности компонента электрического поля в импульсе. Релятивистское уравнение движения i -го электрона имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\vec{v}_i}{\sqrt{1 - v_i^2/c^2}} = -\left(\vec{F} + \frac{1}{c}[\vec{v}_i, \vec{B}]\right) - i \frac{\vec{F}}{r^3}. \quad (14)$$

В рассматриваемом примере $i = 1, 2, \dots, 41600$.

Угловое распределение испускаемых электронов определяется углом отклонения θ от плоскости XY , перпендикулярной направлению распространения лазерного луча, $\theta = \arctan\left(v_z / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}\right)$, где $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ – вектор скорости электрона по окончании импульса.

Уравнение (14) в поле (13) с соответствующими начальными условиями было решено численно для всех электронов, которые покидают кластер, при различных значениях интенсивности I и длительности τ лазерного импульса и расположения кластера относительно оси лазерного луча. Примеры гистограмм угловых распределений электронов приведены на рис. 4. Анализ полученных угловых распределений позволяет сделать вывод о характере зависимости угла отклонения от длительности и интенсивности лазерного импульса. В частности, в случае коротких импульсов $\tau \sim 10$ фс электроны за время τ не успевают покинуть фокальную область. При увеличении длительности до $\tau \sim 100$ фс наблюдается обратная картина: электроны до окончания импульса вылетают из области взаимодействия. В результате при более длинных импульсах наблюдаются меньшие углы отклонения θ .

Электроны, испускаемые кластером, набирают энергии до нескольких МэВ к моменту, когда они вылетают из области действия лазерного импульса. Конечная кинетическая энергия электронов быстро возрастает вместе с углом отклонения θ . Эта корреляция – результат зависимости, как энергии, так и угла от фазы лазерного поля в момент внешней ионизации.

Достижения последних лет в области генерации ультракоротких лазерных импульсов делают возможным изучение эволюции атомарных кластеров на аттосекундных интервалах времени. В **четвертой главе** теоретически исследуются вопросы внутренней и внешней ионизации атомарных кластеров инертных элементов интенсивными аттосекундными импульсами мягкого рентгеновского излучения.

Для определенности рассмотрим импульс длительностью $\tau = 500$ ас, интенсивностью $I = 10^{15}$ Вт/см² со средней энергией кванта $\omega = 150$ эВ, взаимодействующий с криптоновым кластером. В случае полной однократной внутренней ионизации кластера плазменная частота составила бы $\omega_p = \sqrt{4\pi n_a} = 4.6$ эВ. Поскольку $\omega \ll \omega_p$, лазерный импульс свободно

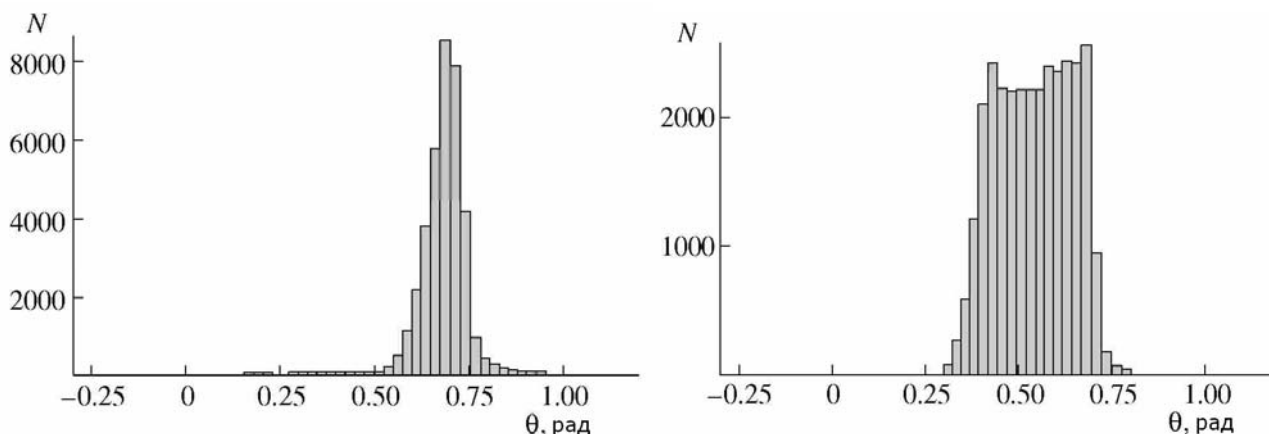


Рис. 4. Угловые распределения электронов, испускаемых ксеноновым кластером радиуса $R = 3$ нм под действием лазерного импульса интенсивностью $I = 10^{19}$ Вт·см⁻² и длительностью $\tau = 40$ фс (слева) и $\tau = 100$ фс (справа).

проникает внутрь кластера. Это верно и при многократной ионизации атомов криптона.

Потенциал ионизации атомов ксенона составляет $E_1 = 14$ эВ. При облучении аттосекундным импульсом должна наблюдаться однофотонная ионизация атомов в кластере. Все фотоэлектроны вылетают примерно с одинаковой энергией, равной $E_e = 136$ эВ. Оценка показывает, что за время аттосекундного импульса ионизируется порядка $w \sim 1\%$ атомов.

Положительный заряд кластера, образованный при вылете всех электронов, равен $Q = 4\pi w n_a R^3/3$. Для того чтобы свободный электрон мог покинуть кластер, его кинетическая энергия должна превышать потенциальную энергию его притяжения к кластеру в момент вылета $E_e > Q/R$. Это условие определяет максимальный радиус кластера, при котором все образованные электроны вылетят из него под действием лазерного поля (внешняя ионизация кластера): $R_{\max} = \sqrt{3E_e/(4\pi w n_a)} = 12$ нм.

Характерные времена электрон-электронных и электрон-ионных столкновений в рассматриваемом кластере составляют около 10 пс, что превышает время существования кластера при воздействии импульса. Это означает невозможность установления максвелловского распределения электронов, а также нагрева образующихся фотоэлектронов. Поэтому в отличие от облучения фемтосекундным лазерным импульсом оптической частоты, при облучении аттосекундным импульсом мягкого рентгеновского излучения в эксперименте должен наблюдаться монохроматический спектр электронов, связанный с однофотонной ионизацией атомов криптона внутри кластера.

Представляет интерес угловое распределение фотоэлектронов, так как оно сохраняется за время лазерного импульса и за время расширения кластера и может быть экспериментально измерено. Оно определяется процессом фотоионизации атома криптона. В диссертации произведено вычисление дифференциального и полного сечений фотоионизации атомов инертных газов излучением мягкого рентгеновского диапазона в рамках теории возмущений первого порядка. Таким образом решена задача об угловых распределениях электронов, испускаемых атомарными кластерами под действием аттосекундных импульсов.

Отдельно стоит отметить существенное отличие динамики ксеноновых кластеров от аргоновых и криптоновых, которое обусловлено наличием гигантского атомного резонанса в ксеноне при энергии квантов около $\omega_0 = 100$ эВ. Этот эффект представляет собой пример сильных электрон-электронных корреляций в атомах и выражается в резком росте сечения фотоионизации при совпадении частоты кванта с собственной частотой колебаний $4d$ -оболочки в ксеноне. Внутренняя ионизация в ксеноновых кластерах идет из $4d$ -оболочки, последующие безызлучательные процессы оже-распада приводят к образованию преимущественно ионов Xe^{2+} и Xe^{3+} . Кроме того, как показывают недавние эксперименты [4] при интенсивностях порядка 10^{15} Вт/см² и выше наблюдается резкий рост выхода многозарядных ионов, что объясняется проявлением нелинейного фотоэффекта. Таким образом, ксеноновые кластеры в поле аттосекундного импульса мягкого рентгеновского

излучения должны характеризоваться заметно более высокой степенью внутренней ионизации. Большая плотность свободных электронов не позволяет произойти полной внешней ионизации, и в кластере формируется электронное облако, которое оказывает существенное влияние на его эволюцию. Существенно изменяются энергетические и угловые распределения электронов.

Если размеры ксенонового кластера заметно меньше длины волны падающего излучения, то есть менее 10 нм, то электроны $4d$ -оболочек всех атомов ксенона осциллируют когерентно. Их вынужденное дипольное излучение пропорционально квадрату числа электронов в кластере, при этом излучение различных кластеров будет некогерентно. На опыте должно наблюдаться мощное дипольное излучение облучаемых кластеров в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации аттосекундного импульса. Мощность рентгеновского излучения кластерным пучком значительно превышает мощность излучения газообразного ксенона, которая пропорциональна лишь первой степени числа атомов.

В диссертации произведена оценка сечения резонансного рассеяния мягкого рентгеновского излучения ксеноновыми кластерами

$$\sigma = \frac{8\pi(10N_a)^2\omega_0^2}{3\gamma^2c^4}, \quad (15)$$

где ширина резонанса по экспериментальным данным $\gamma = 40$ эВ.

Таким образом, в работе показаны существенные отличия эволюции кластерных мишеней при переходе от оптических фемтосекундных к рентгеновским аттосекундным импульсам. При этом вследствие гигантского атомного резонанса в ксеноне на частоте примерно $\omega_0 = 100$ эВ динамика ксеноновых кластеров должна заметно отличаться от динамики аргоновых и криптоновых кластеров.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы настоящей работы.

Основные результаты диссертации

1. Механизм вакуумного нагрева, первоначально предложенный для полубесконечной плазмы с плоской границей, облучаемой интенсивным p -поляризованным лазерным импульсом, модифицирован и применен к случаю больших атомарных кластеров с учетом гидродинамического расширения. Получены универсальные зависимости для поглощенной кластером лазерной энергии и радиуса расширяющегося кластера как функции времени. Показано, что эволюция кластера под действием фемтосекундного импульса определяется одним безразмерным параметром, пропорциональным конечной скорости разлета ионного остова кластера. Сравнение предсказаний модели с результатами существующих экспериментов позволяет сделать вывод о заметном влиянии вакуумного нагрева на динамику кластерных мишеней под действием лазерного импульса. Это влияние особенно существенно в случае интенсивных (10^{16} - 10^{17} Вт/см²) коротких импульсов (десятки фс), когда снижается вклад обратного тормозного эффекта и резонансного увеличения поглощения лазерной энергии.

2. Эффекты экранирования приводят к снижению потенциалов ионизации атомарных ионов в плотной кластерной плазме по сравнению с потенциалами ионизации изолированных ионов. Увеличивая скорость внутренней ионизации, это явление оказывает сильное влияние на эволюцию атомарных кластеров на переднем фронте лазерного импульса. В диссертации численно рассчитаны потенциалы ионизации многозарядных ионов инертных газов в кластерной плазме в широком интервале электронных температур. Получено простое аналитическое выражение, с высокой точностью аппроксимирующее численные расчеты при энергиях электронов выше 30-50 эВ. Результаты могут быть полезны при вычислении вероятностей полевой и ударной ионизации в кластерах. Также рассмотрено уширение атомных уровней квазистатическим микрополем Хольцмарка и показано, что оно значительно меньше соответствующих энергий связи.
3. Проведенное моделирование угловых распределений электронов, испускаемых ван-дер-ваальсовыми кластерами при облучении сверхсильными (интенсивность до 10^{19} Вт/см²) фемтосекундными импульсами, дает возможность восстановить в деталях динамику внешней ионизации кластеров при сравнении с экспериментальными данными. Рассмотрена зависимость угловых распределений от интенсивности и длительности лазерного импульса, а также положения кластера в фокальной области по отношению к оси лазерного луча. Обнаружено быстрое увеличение кинетической энергии электрона с ростом угла его отклонения. Эта корреляция – результат зависимости как энергии, так и угла от фазы лазерного поля в момент внешней ионизации.
4. Теоретически исследованы процессы внутренней и внешней ионизации ван-дер-ваальсовых кластеров интенсивными импульсами аттосекундной длительности. Показано, что лишь небольшая часть атомов кластера ионизируется в течение аттосекундного импульса. Все свободные электроны, появляющиеся внутри (не очень большого) кластера в результате внутренней ионизации, покидают кластер. Продемонстрировано, что энергетические и угловые распределения электронов, эмитируемых кластерами в таких условиях, определяются в отличие от фемтосекундных импульсов только характеристиками процесса фотоионизации одиночных атомов. Получены простые выражения для дифференциального сечения фотоионизации в рамках теории возмущений первого порядка.
5. Показано, что при облучении ксеноновых кластеров излучением мягкого рентгеновского диапазона на длине волны около $\lambda = 12$ нм вследствие эффекта гигантского атомного резонанса должен наблюдаться резкий рост выхода многозарядных ионов, а также сечения рассеяния излучения на кластере по сравнению с аргоновыми и криптоновыми кластерами. В случае, если радиус кластера $R \ll \lambda$, сечение рассеяния пропорционально квадрату числа атомов, составляющих кластер.

Список публикаций по теме диссертации

1. A.V. Getz, V.P. Krainov. Vacuum heating of large atomic clusters by a super-intense femtosecond laser pulse // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 128, вып. 1(7). – С. 95-102.
A.V. Getz, V.P. Krainov. Vacuum heating of large atomic clusters by a super-intense femtosecond laser pulse // ЖЭТФ. – 2005. – Vol. 101. – N. 1. – P. 80-87 (2005).
2. A.V. Gets and V.P. Krainov, The ionization potentials of atomic ions in laser irradiated Ar, Kr and Xe clusters // Journal of Physics B: At. Mol. Opt. Phys. – 2006. – Vol. 39. – P. 1787-1795.
3. A.V. Gets and V.P. Krainov. Rescattering of electrons at the laser-cluster interactions // Laser Physics. – 2007. – Vol. 17. – N. 5. – P. 604-607.
4. A.V. Gets and V.P. Krainov. Angular distribution of ejected electrons at the laser-cluster interactions // Laser Physics. – 2007 – Vol. 17. – N. 6. – P. 880-883.
5. А. Гец, В.П. Крайнов. Вакуумный нагрев больших атомарных кластеров полем фемтосекундного лазерного импульса // Труды XLVII Научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”. Часть VIII “Физика и энергетика”. 26-27 ноября 2004 г. – Москва – Долгопрудный, 2004. (С. 68-69).
6. А.В. Гец, В.П. Крайнов. Вакуумный нагрев электронов в кластерной плазме, создаваемой сверхсильным фемтосекундным лазерным импульсом // Научная сессия МИФИ-2005. III конференция научно-образовательного центра CRDF “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях” Сборник научных трудов – М: МИФИ, 2005–100 с (С.63)
7. А.В. Гец. Вакуумный нагрев больших атомарных кластеров полем фемтосекундного лазерного импульса // Сборник трудов VI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 21–22 апреля 2005 г. (Препринт / Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, №ИБРАЭ-2005-06). – М.: ИБРАЭ РАН, 2005. – 74 с..
8. V.P. Krainov, A.V. Getz. Vacuum heating of cluster plasma by the field of a femtosecond laser pulse // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and the Conference on Lasers, Applications, and Technologies ICONO/LAT 2005, St. Petersburg, Russia, May 11-15, 2005. Technical Digest, IThF1.
9. А.В. Гец, В.П. Крайнов. Потенциалы ионизации атомарных ионов в кластерах Ar, Kr, Xe при воздействии лазерного излучения // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов II Всероссийской конференции молодых ученых (4–6 мая 2006 г., г. Томск). – Томск: Томский государственный университет, 2006. – 512 с. (С. 179-182).
10. A.V. Gets, V.P. Krainov. Ionization potentials of atomic ions in laser-irradiated Ar, Kr and Xe clusters // 15th International Laser Physics Workshop, LPHYS'06, Lausanne, Switzerland, July 24–28, 2006. Book of Abstracts. – P. 141.
11. A.V. Gets, V.P. Krainov. The ionization potentials of atomic ions in laser-irradiated Ar, Kr and Xe clusters // V International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology” (PPPT-5), Minsk, Belarus, September 18–22, 2006. Contributed Papers, Volume 1, Institute of Molecular and Atomic Physics, National Academy of Sciences of Belarus. – P. 432-434.
12. А.В. Гец, В.П. Крайнов. Ионизационные потенциалы атомарных ионов в кластерной плазме при облучении фемтосекундным лазерным импульсом // Тезисы докладов XXXIV

- Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 12–16 февраля 2007 г. – М.: ЗАО НТЦ “ПЛАЗМАИОФАН”, 2007. – 312 с. (С. 164).
13. А.В. Гец, В.П. Крайнов. Рассеяние электронов при взаимодействии лазерного излучения с кластерами // Тезисы докладов XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 12–16 февраля 2007 г. – М.: ЗАО НТЦ “ПЛАЗМАИОФАН”, 2007. – 312 с. (С. 222).
 14. Gets A.V., Krainov V.P. Rescattering of electrons at the laser-cluster interactions // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and the Conference on Lasers, Applications, and Technologies ICONO/LAT 2007, Minsk, Belarus, May 28 – June 1, 2007. Conference Program. – P. 68. Technical Digest, I03/III-3.
 15. A.V. Gets, V.P. Krainov. Angular distributions of atomic ions at the irradiation of large atomic clusters by intense femtosecond laser pulses // 17th International Laser Physics Workshop, LPHYS’08, Trondheim, Norway, June 30–July 4, 2008. Book of Abstracts. – P. 158.
 16. А.В. Гец, В.П. Крайнов, Фононная рекомбинация носителей заряда на примесях в полупроводниках при сверхнизких температурах // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 9 – 13 февраля 2009 г. – М.: ЗАО НТЦ “ПЛАЗМАИОФАН”, 2009. – 358 с.
 17. Гец А.В., Крайнов В.П. Фононная рекомбинация носителей заряда, индуцированных лазерным излучением, на примесях в полупроводниках при сверхнизких температурах // Сборник докладов “Третьей Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям”, 20-23 апреля 2009 г. – Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”.
 18. A.V. Gets and V.P. Krainov. Inner and Outer Ionization of Atomic Clusters by an Intense Attosecond Laser Pulse // 2nd International Conference on Attosecond Physics ATTO-09, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA, July 28 – August 1, 2009. Book of Abstracts. – P. 69.
 19. A.V. Gets and V.P. Krainov. Inner and Outer Ionization of Atomic Clusters by an Intense Attosecond Laser Pulse // International Conference “Light at Extreme Intensities – Scientific opportunities and technological issues of the Extreme Light Infrastructure – LEI 2009”, Brasov, Romania, October 16 – 21, 2009. Book of Abstracts. – P. 90.
 20. А.В. Гец, В.П. Крайнов. Внутренняя и внешняя ионизация атомарных кластеров сильным аттосекундным лазерным импульсом // Труды XXIV-го Съезда по спектроскопии: Том 2. – Троицк: “Тривант”, 2010. – 290 с. (С. 523).

Цитированная литература

1. В.П. Крайнов, Б.М. Смирнов, М.Б. Смирнов. Фемтосекундное возбуждение кластерных пучков // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – N. 9. – С. 953 – 981.
2. F. Brunel. Not-So-Resonant, Resonant Absorption // Physical Review Letters. – 1987. – Vol.59. – P.52-55.
3. Л.А. Вайнштейн, И.И. Собельман, Е.А. Юков. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. – М.: Наука, 1979. – 319 с.
4. M. Richter et al. Extreme Ultraviolet Laser Excites Atomic Giant Resonance // Physical Review Letters. – 2009. – Vol. 102. – P. 163002.

Гец Артем Викторович

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ АТОМАРНЫХ КЛАСТЕРОВ С
ПОЛЕМ СВЕРХКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Подписано в печать 14.04.10. Формат 60 x 84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 90 экз. Заказ № ф-

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»
Отдел автоматизированных издательских систем «ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ»
141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9