



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 150 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**Болдарев А.С., Гасилова И.В.,
Шарова Ю.С.**

Математическое
моделирование
газокластерных мишеней
для фемтосекундных
лазерных импульсов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Болдарев А.С., Гасилова И.В., Шарова Ю.С. Математическое моделирование газокластерных мишеней для фемтосекундных лазерных импульсов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 150. 22 с. doi:[10.20948/prepr-2018-150](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-150)

URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-150>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М. В. Келдыша
Российской академии наук

А. С. Болдарев, И. В. Гасилова, Ю. С. Шарова

Математическое моделирование
газокластерных мишеней
для фемтосекундных лазерных
импульсов

Москва — 2018

Болдарев А. С., Гасилова И. В., Шарова Ю. С.

Математическое моделирование газокластерных мишеней для фемтосекундных лазерных импульсов

Взаимодействие фемтосекундных сверхмощных лазерных импульсов с кластерами характеризуется увеличенным поглощением падающего лазерного света по сравнению с взаимодействием с твердыми мишенями и приводит к усиленной генерации различных квантовых пучков с уникальными параметрами. Дальнейшие исследования такого взаимодействия требуют детального моделирования и оптимизации параметров кластеров, например, для получения кластеров требуемого размера или определенной пространственной конфигурации мишени, и т. д. В настоящей работе представлена математическая модель формирования газокластерной мишени в сопловых течениях газов и бинарных смесей. Представлены и проанализированы некоторые численные результаты. Обсуждаются способы экспериментальной верификации получаемых численных результатов.

Ключевые слова: взаимодействие сверхинтенсивного фемтосекундного лазера с кластерами, кластерные мишени, численное моделирование, сопловое течение, кинетика кластеризации

Alexey Sergeevich Boldarev, Irina Vladimirovna Gasilova, Yulia Sergeevna Sharova

Mathematical modelling of the cluster targets for femtosecond-laser-cluster-driven experiments

The interaction of femtosecond ultra-intense laser pulses with clusters increases absorption of the incident laser light compared to the interaction with solid targets and leads to enhanced generation of different quantum beams with unique parameters. Future investigations of such interaction urgently need detailed modeling and optimization of cluster parameters, for instance, in order to obtain the clusters with desired size, or some specific spatial configuration of the target etc. A numerical model of gas-cluster targets production by the nozzle flows of gases and binary mixtures is presented. Some previous results of the model utilization are summarized, and some new results are given. Techniques of experimental verification of the numerical results are discussed.

Key words: ultra-intense femtosecond laser-clusters interaction, cluster targets, numerical modelling, nozzle flow, kinetics of clusterization

1 Введение

Исследование взаимодействия сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения с твердыми и газовыми средами стало особенно важным в последние годы благодаря возможности изучения фундаментальных свойств вещества в экстремальных состояниях и позволило использовать новые подходы к решению различных прикладных задач. Одним из широко используемых типов мишеней для облучения сверхкороткими лазерными импульсами являются кластерные мишени, в которых газ, истекающий через сверхзвуковое сопло, формирует струю с включениями жидкой (или твердой) фазы (кластерами) [1–59]. С мишенями такого типа возможно объединить преимущества твердой (высокая плотность) и газовой (отсутствие осколков, легкая регенерация) мишеней. Из-за повышенного поглощения такие мишени сильно нагреваются, что приводит к усиленной генерации пучков излучения и различных частиц (обычно называемых квантовыми пучками). Фактически в экспериментах с мишенями такого типа были получены очень многообещающие результаты для различных приложений, таких как ядерный синтез [1], рентгеновское излучение [2–23], бетатронное рентгеновское излучение [24], лазерное ускорение ионов [2, 3, 25–30], лазерно-кластерное ускорение электронов [2, 25, 31–33] и др.

В отличие от твердых и газовых мишеней, для кластерной мишени трудно определить начальное (перед лазерным импульсом) состояние, т. е. концентрацию и средний размер кластеров, их распределение и т. д. Так как процессы образования кластеров в газовой струе достаточно сложны, не существует простой процедуры оценки, которая давала бы адекватные результаты во всех случаях. Один из наиболее часто используемых подходов — это эвристическая скейлинговая теория Хагены [34], в которой средний размер кластера (среднее количество атомов в кластере) дается формулой

$$\langle N \rangle = 33 \left(\frac{\Gamma^*}{1000} \right)^{2.35} \quad (\text{для } \Gamma^* > 1000), \quad (1)$$

где параметр Γ^* , как предполагается, полностью определяет процесс кластеризации и дается выражением

$$\Gamma^* = k_h \left(\frac{0.74 d}{\tan \alpha} \right)^{0.85} P_0 T_0^{-2.29}, \quad (2)$$

где $k_h = 1650$ для аргона и $k_h = 2890$ для криптона, d — критический диаметр сопла в микрометрах, P_0 и T_0 — начальное давление и температура газа (в миллибарах и кельвинах соответственно), α — половинный угол расширения конического сопла.

Из этих выражений видно, что геометрия сопла учитывается посредством всего лишь двух параметров — критического диаметра d и половинного угла α расширения. Свойства используемого газа представлены только одним числом k_h . Кроме того, эта теория не дает пространственного распределения параметров газокластерного течения. Таким образом, эта теория может быть верна лишь для ограниченного числа вариантов — конические сопла, аргон и криптон как рабочее вещество. Тем не менее, эта теория широко применяется из-за ее простоты и легкости в использовании; уже стало традицией сравнивать с ней результаты других методик оценки параметров кластеров.

Для получения более надежных данных для широкого круга вариантов (формы сопел, рабочие вещества и начальные состояния газов) были разработаны некоторые экспериментальные методики. Обычно используются интерферометрические измерения для получения средней плотности струи и рэлеевское рассеяние для получения параметров кластеров, [35–37]. Рэлеевское рассеяние дает сигнал, пропорциональный $n_c \langle N^2 \rangle \approx (1 - \beta)n_a \langle N \rangle$, где n_c и n_a — концентрации кластеров и атомов (или молекул для молекулярных газов), N — количество атомов (молекул) в кластере, β — массовая доля газовой фазы в газокластерной среде. Зная также концентрацию атомов n_a из интерферометрии, можно определить два параметра из трех независимых: β , n_c и $\langle N \rangle$, так что требуется некоторая дополнительная информация для получения полного описания кластеризованной среды. В [35] предполагается, что $1 - \beta$ — величина порядка 1, и поэтому, предположив $\beta = 0$, мы внесем ошибку не больше чем в несколько раз. В [36] значение β берется из численного моделирования.

Для больших (субмикронного размера) кластеров (которые получаются с помощью специально сконструированного сопла) можно использовать экспериментальные методики на основе рассеяния Ми вместо рэлеевского рассеяния [38, 39]. Это позволяет непосредственно получить средний размер кластера и его среднеквадратичное отклонение (но в предположении, что распределение кластеров по размерам логарифмически нормальное).

Еще один метод исследования кластерных мишеней — это численное моделирование. Была предложена математическая модель [40, 41, 60], основанная на представлении кластеров как сферических микрокапель и на кинетической теории Я. И. Френкеля [61, 62]. Позже эта модель была обобщена на случай бинарных смесей газов, в которых одна компонента не образует кластеров [38]. По результатам моделирования оказалось, что бинарные смеси могут обеспечить высокую степень кластеризации кластеризующейся компоненты, причем газ между кластерами состоит главным образом из инертной компоненты. Это очень удобно для генерации мягких рентгеновских лучей, когда в случае однородного рабочего вещества межкластерный газ мог бы поглотить значительную часть рентгеновского излучения, испускаемого осве-

ценными лазерным импульсом кластерами. В случае смеси He + CO₂ гелий не поглощает излучения [4–6].

2 Математическая модель кластеризации в сопловых течениях бинарных смесей

Рассмотрим газовую смесь из двух компонент: инертной (обозначаемой индексом i) и кластеризующейся, или конденсирующей (обозначаемой индексом c). Конденсирующаяся компонента, в свою очередь, разделена на газовую фазу (индекс g) жидкую, или конденсирующуюся, обозначаемую индексом l . Таким образом, фактически смесь состоит из трех компонент: инертная i , конденсирующийся газ cg и кластеры cl .

Так как мы предполагаем кластеры маленькими и неподвижными относительно окружающего газа, мы можем считать состав нашей смеси (а именно массовое или молярное соотношение между компонентами i и c) постоянным и известным. Введем величину φ — массовую долю конденсирующейся компоненты. Таким образом, для плотностей компонент можно написать

$$\rho_c = \varphi\rho, \quad \rho_i = (1 - \varphi)\rho.$$

Введем также так называемую *степень сухости* β , которая есть массовая доля подкомпоненты cg во всей компоненте c . Тогда можно написать также

$$\rho_{cg} = \beta\rho_c = \beta\varphi\rho, \quad \rho_{cl} = (1 - \beta)\rho_c = (1 - \beta)\varphi\rho, \quad \rho_i = (1 - \varphi)\rho.$$

В этих выражениях ρ_{cg} , ρ_{cl} и ρ_i — плотности компонент смеси, т. е. масса соответствующей компоненты на единицу объема всей смеси. Поскольку объем кластеров пренебрежимо мал, для газовых компонент они являются также плотностями самих этих компонент, которые входят во все термодинамические соотношения для соответствующей компоненты. Для кластеров, разумеется, ρ_{cl} много меньше, чем плотность жидкой фазы, которую мы будем обозначать как ρ_l^0 .

Процесс образования кластеров может быть описан в кинетических терминах и, разумеется, является существенно неравновесным. Тем не менее мы предполагаем две *газовые* компоненты i и cg находящимися в термодинамическом равновесии друг с другом. Таким образом, температура обеих компонент газовой фазы одинакова, $T_i = T_{cg} = T$, и может отличаться от температуры кластеров T_{cl} . Другое предположение заключается в том, что давление смеси, в соответствии с законом Дальтона, равно сумме парциальных давлений газообразных компонент, $P = P_i + P_{cg}$. Жидкая фаза не оказывает давления, так как она не является сплошной.

Эти предположения позволяют рассматривать плотность и удельную внутреннюю энергию смеси в целом, а не отдельных компонент. Таким образом, система уравнений модели практически не отличается от таковой в случае чистого рабочего газа [40, 41, 60]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\operatorname{grad} P, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon + \rho \frac{\mathbf{v}^2}{2} \right) + \operatorname{div} \left(\rho \mathbf{v} \left(\varepsilon + \frac{\mathbf{v}^2}{2} \right) \right) = -\operatorname{div} P \mathbf{v}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \Omega_n}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \Omega_n) = I r_*^n + \dot{r} n \rho \Omega_{n-1}, \quad n = 0, 1, 2, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \beta}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \beta) = -\frac{4}{3} \frac{\pi \rho_l^0 I r_*^3}{\varphi} - \frac{4\pi \rho \rho_l^0 \dot{r} \Omega_2}{\varphi}. \quad (7)$$

Здесь Ω_n — моменты функции распределения кластеров по радиусу:

$$\rho \Omega_n = \int_0^{\infty} r^n f(r, \mathbf{x}, t) dr.$$

Таким образом, для третьего момента можно написать

$$1 - \beta = \frac{4}{3} \frac{\rho_l^0 \pi \Omega_3}{\varphi}.$$

Мы используем ту же самую модель кинетики фазовых переходов, что и в случае чистого газа, но принимая во внимание присутствие инертной компоненты. Инертная компонента влияет на газодинамические параметры смеси, но не участвует собственно в процессе кластерообразования. Для замыкания системы (3)–(7) мы используем следующие соотношения. Критический радиус

$$r_* = \frac{2\sigma(T)}{\rho_l^0 R T \ln(P_{cg}/P_s(T))}. \quad (8)$$

Скорость ядрообразования

$$I = \frac{1}{\rho_l^0} \sqrt{\frac{2\sigma(T)\mu}{\pi N_A}} \left(\frac{P_{cg}}{kT} \right)^2 \exp \left(-\frac{4\pi\sigma(T)r_*^2}{3kT} \right). \quad (9)$$

Скорость роста кластеров

$$\dot{r} = \frac{P_{cg}}{\rho_l^0 \sqrt{2\pi RT}} \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_s(P_{cg})}} \right). \quad (10)$$

Модель также включает в себя некоторые термодинамические соотношения, которые выражают свойства рабочего вещества и замыкают систему уравнений. Для замыкания системы требуются выражения $P(\rho, \varepsilon, \beta)$, $T(\rho, \varepsilon, \beta)$, а также некоторые выражения для величин на линии насыщения. В модели для чистого газа мы использовали выражения

$$P = P(\rho, \varepsilon, \beta) = \rho \frac{\varepsilon + (1 - \beta) L_s}{\frac{\gamma}{\beta(\gamma - 1)} - 1}, \quad T = \frac{P}{\beta Z \rho R}, \quad (11)$$

являющиеся следствием уравнения состояния идеального газа и соотношения между теплотой фазового перехода и значениями энтальпии различных фаз

$$L_s = H_g - H_l.$$

В модели газовой смеси мы применяем (11) к каждой из компонент i и c . В результате вместо явного выражения (11) мы получаем систему алгебраических уравнений, включающую (11) для обеих компонент, равенство температур компонент и соотношение между удельными внутренними энергиями компонент:

$$\varepsilon = (1 - \varphi)\varepsilon_i + \varphi\varepsilon_c.$$

3 Экспериментальная верификация модели

Описанная выше численная модель основана на некоторых предположениях, не представляющихся достаточно надежными. Основное возражение вызывает применение термодинамического подхода к критическим зародышам кластеров. Кроме того, термодинамические свойства рабочего вещества неизвестны точно, так как возникновение кластеров происходит в метастабильном переохлажденном газе. Поэтому необходима экспериментальная верификация получаемых по данной модели численных результатов.

Косвенное экспериментальное подтверждение адекватности модели (вернее, ее версии для чистого газа) было получено, когда на основе расчетов было разработано специальное трехступенчатое коническое сопло [40] для получения крупных (субмикронных размеров) кластеров. Крупные кластеры нужны для уменьшения влияния предимпульса в случае низкого контраста лазерного импульса [7]. Сопло состояло из трех последовательных конических ступеней, первая из которых расширялась от диаметра 0.5 мм до 0.7 мм и имела

длину 29 мм, вторая расширялась от 0.7 до 0.8 мм на длине 30 мм, и последняя ступень, длиной 16 мм, имела выходной диаметр 2 мм. Такая геометрия сопла была выбрана на основе численного моделирования для аргона при начальном давлении 60 бар. Хотя первоначально прямые экспериментальные измерения размеров кластеров не проводились, в [7] отмечалась хорошая корреляция между измеренной в эксперименте интенсивностью рентгеновского излучения и полученным из расчетов средним размером кластера.

Субмикронные размеры кластеров позволили применить экспериментальную технику на основе рассеяния Ми вместо обычно используемого рэлеевского рассеяния [38, 39]. В этих работах рассматривались бинарные смеси $\text{He}(90\%) + \text{CO}_2(10\%)$ и $\text{H}_2(70\%) + \text{CO}_2(30\%)$ при начальном давлении 60 бар. Для описанного выше трехступенчатого сопла расчеты дали для среднего размера кластера значения 0.360 мкм и 0.588 мкм соответственно, причем среднеквадратичное отклонение составило 0.072 мкм и 0.090 мкм для этих двух газовых смесей соответственно. Экспериментальные измерения среднего размера кластера были проведены с использованием рассеяния Ми, и они дали значения 0.26 ± 0.04 мкм (S.D. 0.08 ± 0.01 мкм) и 0.28 ± 0.03 мкм (S.D. 0.13 ± 0.02 мкм) соответственно. Таким образом, расхождение между экспериментальными и численными результатами примерно двукратное. Следует заметить, что двукратное различие в диаметре кластера соответствует различию примерно на порядок величины в объеме и, соответственно, количестве атомов (молекул).

Систематическое сравнение параметров кластеров, полученных численным моделированием и из эксперимента, недавно было проведено в [36]. Авторы этой работы исследовали математические модели образования кластеров, очень близкие к (3)–(11), но с более точным термодинамическим замыканием. При рассмотрении модели возникают некоторые вопросы, как, например, какую температуру следует приписать зародышу кластера, возникшему в переохлажденном газе — температуру окружающего газа или температуру насыщения при давлении окружающего газа. В зависимости от ответа на этот и другие подобные вопросы можно получить различные варианты модели, результаты которых могут сильно отличаться друг от друга. На самом деле, на эти вопросы нет убедительного и определенного ответа, так как они основаны на предположении применимости термодинамического подхода к возникающим зародышам кластеров.

На основании сравнения численных результатов с экспериментальными данными в [36] был выбран вариант модели (называемый базовой моделью), для которого результаты были ближе всего к эксперименту. Для этой модели расхождение с экспериментом, тем не менее, оставалось на уровне одного порядка величины, что близко к тому, что наблюдалось в [38, 39]. Следует заметить, что в [36] рассматривались другие условия эксперимента, в част-

ности, в качестве рабочего вещества использовался аргон, и геометрия сопла была другой. При таких условиях образование крупных кластеров не ожидается, поэтому для измерений использовалась традиционная экспериментальная методика, основанная на интерферометрии и рэлеевском рассеянии. Недостающий третий параметр брался из численного моделирования — было отмечено, что степень сухости β , в отличие от размеров кластеров, не зависит от варианта модели. Такое заключение вполне ожидаемо, так как степень сухости является характеристикой термодинамически равновесного состояния, она не должна зависеть от кинетических процессов образования зародышей кластеров, которые влияют на такие параметры, как размеры кластеров и их концентрация.

Для сравнения нашей модели (3)–(11) с базовой моделью, предложенной в [36], мы провели расчеты вариантов, рассмотренных в [36], по нашей модели. В соответствии с [36], было взято плоскосимметричное сопло с шириной в критическом сечении 0.22 мм, полной длиной 10 мм и половинным углом расширения 14° , рабочий газ был аргон. Было рассчитано две серии вариантов, в серии с переменным давлением температура была 293 К, а давление менялось от 10 до 100 бар. В температурной серии давление было фиксированным и равным 50 бар, тогда как температура менялась от 200 до 350 К. Отдельный вариант из той или другой серии может быть определен начальными давлением или температурой P_0 или T_0 , но в [36] варианты характеризовались параметром Хагены Γ^* (2), являющимся функцией P_0 и T_0 . Фактически Γ^* не используется ни в нашей модели, ни в моделях, описанных в [36], и поэтому нет никакого физического смысла в идентификации вариантов с помощью этого параметра, это всего лишь вопрос представления результатов. Более того, параметр Γ^* вводился для конических сопел, тогда как в статье [36] рассматриваются плоскосимметричные. Мы используем этот способ идентификации вариантов для представления наших расчетных результатов для удобства сравнения их с результатами из [36]. Кроме того, представление результатов в форме зависимости от Γ^* позволяет представить результаты для обеих серий, с изменяющимся давлением и изменяющейся температурой, на одном графике, см. рис. 1–3. При этом хорошо видно, что зависимость вычисленных параметров от Γ^* разная для разных серий вариантов, что лишний раз показывает отсутствие физического смысла параметра Γ^* и что этот параметр не может рассматриваться как величина, полностью определяющая процесс кластеризации.

На рис. 1–3 представлены результаты одномерных расчетов. Синие и красные линии и полые значки взяты из [36] и соответствуют результатам базовой модели для вариантов из серии с переменным давлением и переменной температурой соответственно. Результаты нашей модели (3)–(11) представлены зелеными (для серии с переменным давлением) и пурпурными (для темпе-

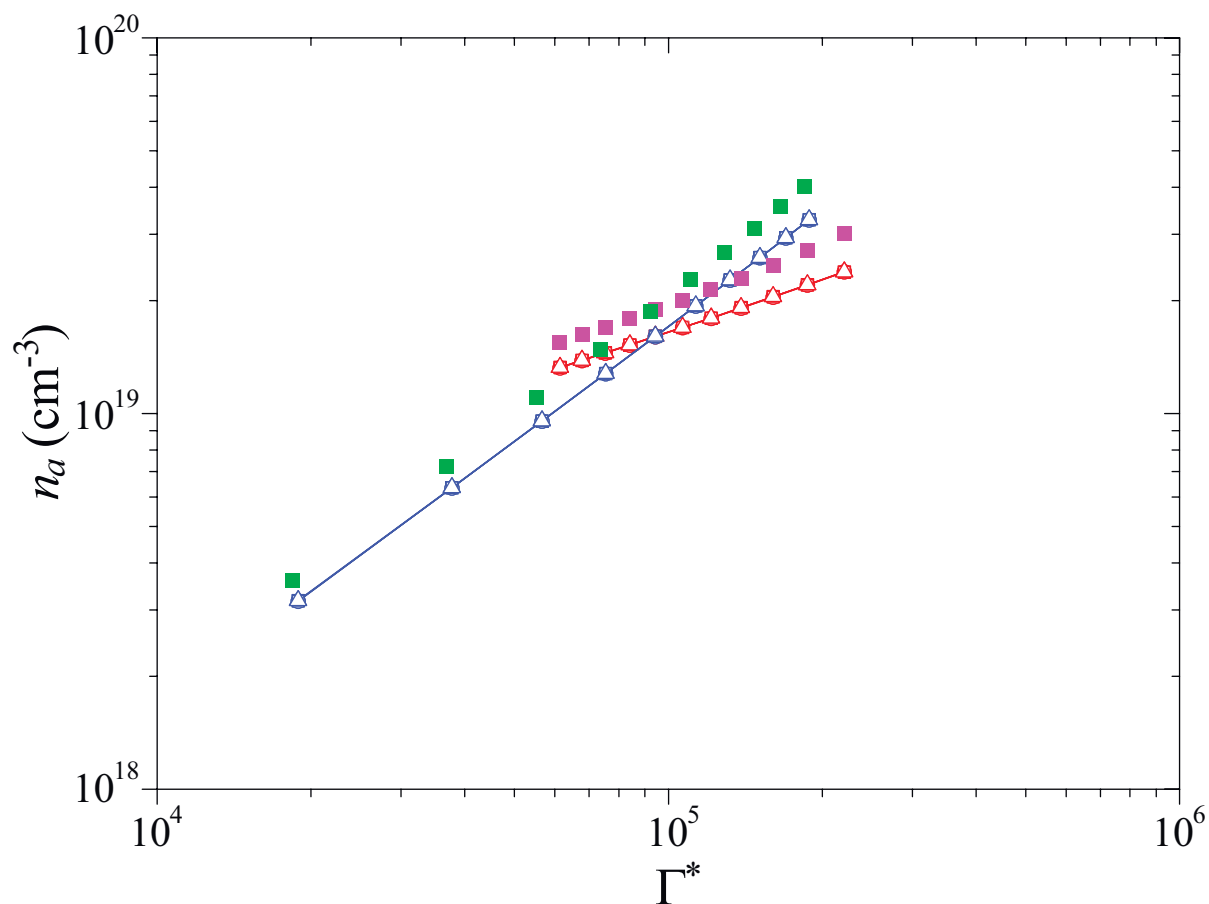


Рис. 1: Полная концентрация атомов n_a как функция от параметра Хагены Γ^* в выходном сечении сопла. Полые значки и линии соответствуют результатам [36], синие — серия с переменным давлением (начальное давление P_0 меняется от 10 до 100 бар при постоянной начальной температуре $T_0 = 293$ К), красные — температурная серия (начальная температура T_0 меняется от 200 до 350 К при постоянном начальном давлении $P_0 = 50$ бар). Зеленые и пурпурные сплошные квадратики — результаты расчетов по нашей модели (3)–(11), серия с переменным давлением и переменной температурой соответственно.

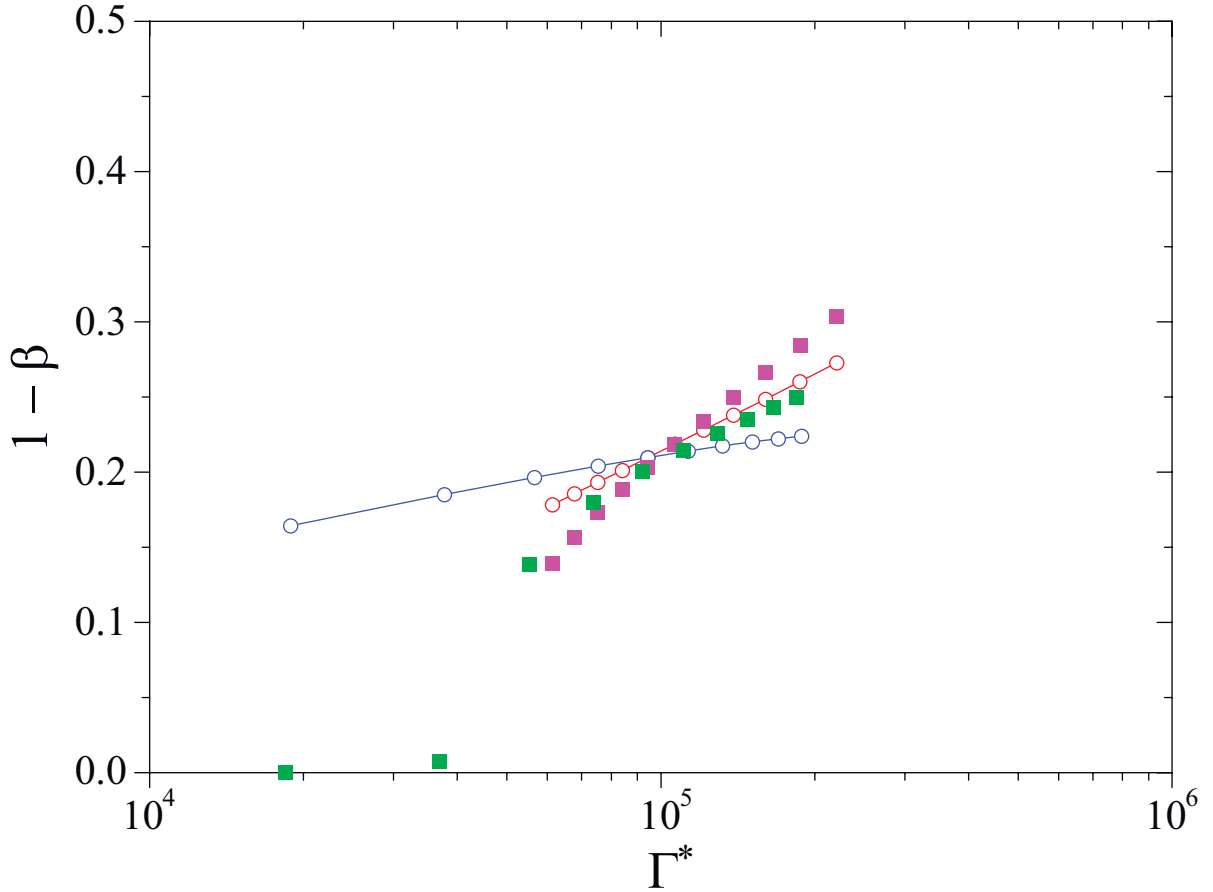


Рис. 2: Массовая доля жидкой фазы $1 - \beta$ как функция от параметра Хагены Γ^* в выходном сечении сопла. Полые кружочки и линии соответствуют результатам [36], синие — серия с переменным давлением (начальное давление P_0 меняется от 10 до 100 бар при постоянной начальной температуре $T_0 = 293$ К), красные — температурная серия (начальная температура T_0 меняется от 200 до 350 К при постоянном начальном давлении $P_0 = 50$ бар). Зеленые и пурпурные сплошные квадратики — результаты расчетов по нашей модели (3)–(11), серия с переменным давлением и переменной температурой соответственно.

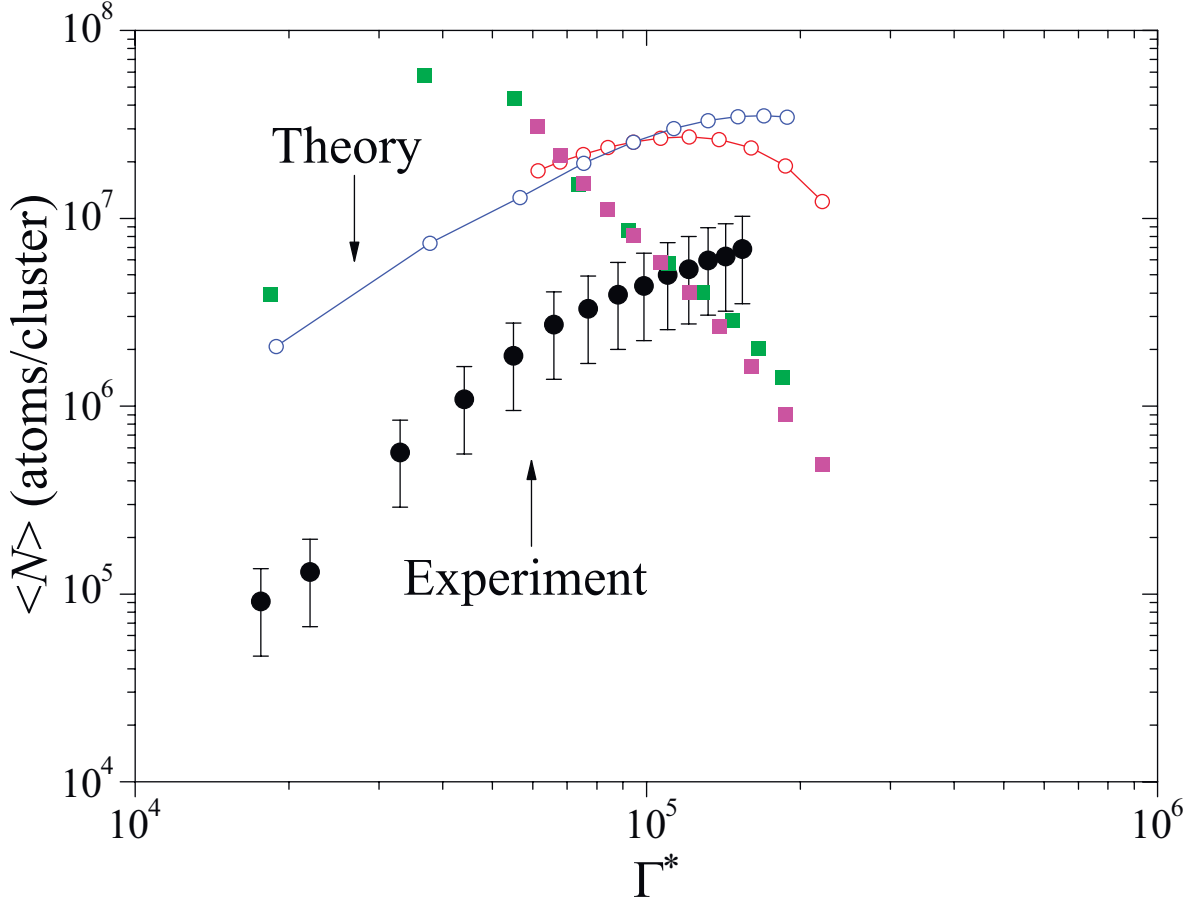


Рис. 3: Среднее количество атомов в кластере $\langle N \rangle$ как функция от параметра Хагены Γ^* в выходном сечении сопла. Полые кружочки и линии соответствуют результатам [36], синие — серия с переменным давлением (начальное давление P_0 меняется от 10 до 100 бар при постоянной начальной температуре $T_0 = 293$ K), красные — температурная серия (начальная температура T_0 меняется от 200 до 350 K при постоянном начальном давлении $P_0 = 50$ бар). Зеленые и пурпурные сплошные квадратики — результаты расчетов по нашей модели (3)–(11), серия с переменным давлением и переменной температурой соответственно. Черными кружочками отмечены экспериментальные данные [36], полученные при разных давлениях и начальной температуре $T_0 = 293$ K.

ратурной серии) сплошными квадратиками. Кроме того, экспериментальные результаты [36] представлены на рис. 3 в виде сплошных черных кружочков с планками погрешностей.

Величины n_a и β , показанные на рис. 1–2, определяются газодинамическими и термодинамическими процессами, на них не оказывают влияния кинетические процессы образования кластеров. В [36] эти значения практически не зависят от варианта модели. Тем не менее, различия в термодинамическом замыкании моделей (нашей (3)–(11) и [36]) приводят к значительным отличиям значений этих величин.

Что касается величин, обусловленных кинетическими процессами, например среднего размера кластера, то различия между результатами, полученными по базовой модели [36] и по нашей модели (3)–(11), более заметны, см. рис. 3. Как было отмечено в [36], для нашей модели (3)–(11) имеет место обратная зависимость размера кластера от параметра Хагены Γ^* . Для некоторых вариантов (и определенного диапазона Γ^*) результаты модели (3)–(11) соответствуют данным, полученным по базовой модели [36], и экспериментальным данным, с учетом их расхождения на порядок величины.

Результаты сравнения численных и экспериментальных данных, представленные на рис. 3, показывают, что обе модели, наша (3)–(11) и базовая из [36], дают ошибку на порядок величины для значений $\langle N \rangle$. Как было отмечено выше, это также имело место при применении нашей модели к экспериментальным вариантам [38, 39]. В настоящее время численные модели не дают более высокой точности прогноза размера кластера. Это может объясняться вышеупомянутым принципиальным недостатком моделей кластерообразования — они применяют термодинамический подход к метастабильному состоянию газа и к очень мелким объектам наподобие ядер кластеризации, которые следовало бы рассматривать на молекулярном уровне. С другой стороны, мы не можем всецело полагаться на точность экспериментальных методик измерения размеров кластеров. Могут быть также и другие объяснения существующего расхождения между данными, получаемыми из эксперимента и моделирования. Например, точность изготовления сопла ограничена, и в результате в расчетах может фигурировать иная, чем в эксперименте, геометрия сопла. Также форма сопла и качество его поверхности может меняться в ходе экспериментов под действием возникающего рентгеновского излучения и потоков различных частиц.

4 Заключение

Численное моделирование стало важным источником информации о параметрах кластерных мишеней. Модель (3)–(11) обычно дает качественное согласие с экспериментальными данными и позволяет понять, чего можно ожидать,

проводя эксперимент с определенной конфигурацией (геометрия сопла, рабочий газ и его начальное состояние). Результаты, полученные по этой модели, позволили провести оптимизацию экспериментальных конфигураций для получения мощных квантовых пучков в экспериментах с кластерными мишенями и фемтосекундными лазерными импульсами (см. результаты, полученные в [2, 4, 5, 7–16, 25–28, 31, 32, 42–51]). В последние годы, когда были разработаны экспериментальные методики измерения параметров кластеров [38, 39], стало ясно, что требуется дальнейшее развитие математической модели для получения более точного количественного соответствия.

В заключение авторы хотели бы выразить свою признательность коллегам — физикам-экспериментаторам, в многолетнем сотрудничестве с которыми проводились исследования, лежащие в основе этой работы. Наиболее важная роль (в организации взаимодействия с различными экспериментальными группами, в постановках задач) принадлежит А. Я. Фаенову. В разные периоды проведения исследований авторы работали в сотрудничестве с экспериментальными группами Кансайского Института Фотонных Исследований, Киото, Япония (Й. Фукуда и др.), Центра Исследований Сверхмощных Лазеров и их Приложений университета Бордо (F. Blasco, F. Dorchies и др.), Исследовательского центра Сакле, Франция (Т. Auguste, Р. d’Oliveira, S. Hulin и др.)

Список литературы

- [1] Ditmire, T., Zweiback, J., Yanovsky, V. P., Cowan, T. E., Hays, G., Wharton, K. B. (1999). Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters. *Nature* **398**, 489–492.
- [2] Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Fukuda, Y., Skobelev, I. Yu., Nakamura, T., Bulanov, S. V., Hayashi, Y., Kotaki, H., Pirozhkov, A. S., Kawachi, T., Chen, L. M., Zhang, L., Yan, W. C., Yuan, D. W., Mao, J. Y., Wang, Z. H., Fortov, V. E., Kato, Y., Kando, M. (2013). Generation of Quantum Beams in Large Clusters Irradiated by Super-Intense, High-Contrast Femtosecond Laser Pulses. *Contributions to Plasma Physics* **53**, 148–160.
- [3] Kim, K. Y., Milchberg, H., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu. (2006). X-ray spectroscopy of 1 cm plasma channels produced by self-guided pulse propagation in elongated cluster jets. *Phys. Rev. E* **73**, 066403.
- [4] Fukuda, Y., Faenov, A. Ya., Pikuz, T., Kando, M., Kotaki, H., Daito, I., Ma, J., Chen, L. M., Homma, T., Kawase, K., Kameshima, T., Kawachi, T., Daido, H., Kimura, T., Tajima, T., Kato, Y., Bulanov, S. V. (2008). Soft

x-ray source for nanostructure imaging using femtosecond-laser-irradiated clusters. *Appl. Phys. Lett.* **92**, 121110.

- [5] Pikuz, T. A., Faenov, A. Ya., Gasilov, S. V., Skobelev, I. Yu., Fukuda, Y., Kando, M., Kotaki, H., Homma, T., Kawase, K., Hayahsi, Y., Kawachi, T., Daido, H., Kato, Y., Bulanov, S. (2009). Propagation-based phase-contrast enhancement of nanostructure images using a debris-free femtosecond-laser-driven cluster-based plasma soft x-ray source and an LiF crystal detector. *Appl. Opt.* **48**, 6271–6276.
- [6] Gasilov, S. V., Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Fukuda, Y., Kando, M., Kawachi, T., Skobelev, I. Yu., Daido, H., Kato, Y., Bulanov, S. V. (2009). Wide-field-of-view phase-contrast imaging of nanostructures with a comparatively large polychromatic soft x-ray plasma source. *Opt. Lett.* **34**, 3268–3270.
- [7] Fukuda, Y., Akahane, Y., Aoyama, M., Inoue, N., Ueda, H., Kishimoto, Y., Yamakawa, K., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu., Abdallah, Jr., J., Csanak, G., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A. (2004). Generation of X rays and energetic ions from superintense laser irradiation of micron-sized Ar clusters. *Laser and Particle Beams* **22**, 215–220.
- [8] Abdallah, Jr., J., Faenov, A. Ya., Skobelev, I. Yu., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Auguste, T., D'Oliveira, P., Hulin, S., Monot, P. (2001). Hot-electron influence on the x-ray emission spectra of Ar clusters heated by a high-intensity 60-fs laser pulse. *Phys. Rev. A* **63**, 032706.
- [9] Junkel-Vives, G. C., Abdallah, Jr., J., Blasco, F., Dorchies, F., Caillaud, T., Bonte, C., Stenz, C., Salin, F., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu. (2002). Evidence of supercritical density in 45-fs-laser-irradiated Ar-cluster plasmas. *Phys. Rev. A* **66**, 033204.
- [10] Abdallah, Jr., J., Csanak, G., Fukuda, Y., Akahane, Y., Aoyama, M., Inoue, N., Ueda, H., Yamakawa, K., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu. (2003). Time-dependent Boltzmann kinetic model of x rays produced by ultrashort-pulse laser irradiation of argon clusters. *Phys. Rev. A* **68**, 063201.
- [11] Фукуда, Й., Ямакава, К., Акахане, Й., Аояма, М., Иноуе, Н., Уеда, Х., Абдаллах, Дж. мл., Ксанак, Дж., Фаенов, А. Я., Магунов, А. И., Пикюз, Т. А., Скобелев, И. Ю., Болдарев, А. С., Гасилов, В. А. (2003). Рентгеноспектральные наблюдения образования микрокапельной плазмы под

воздействием сверхинтенсивного лазерного излучения. *Письма в ЖЭТФ* **78**, 146–149.

- [12] Sherrill, M. E., Abdallah, Jr., J., Csanak, G., Dodd, E. S., Fukuda, Y., Akahane, Y., Aoyama, M., Inoue, N., Ueda, H., Yamakawa, K., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu. (2006). Spectroscopic characterization of an ultrashort-pulse-laser-driven Ar cluster target incorporating both Boltzmann and particle-in-cell models. *Phys. Rev. E* **73**, 066404.
- [13] Colgan, J., Abdallah, Jr., J., Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu., Fortov, V. E., Fukuda, Y., Akahane, Y., Aoyama, M., Inoue, N., Yamakawa, K. (2008). The role of hollow atoms in the spectra of an ultrashort-pulse-laser-driven Ar cluster target. *Laser and Particle Beams* **26**, 83–94.
- [14] Berkelbach, T. C., Colgan, J., Abdallah, Jr., J., Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Fukuda, Y., Yamakawa, K. (2009). Modeling energy dependence of the inner-shell x-ray emission produced by femtosecond-pulse laser irradiation of xenon clusters. *Phys. Rev. E* **79**, 016407.
- [15] Hayashi, Y., Fukuda, Y., Faenov, A. Ya., Kando, M., Kawase, K., Pikuz, T. A., Homma, T., Daido, H., Bulanov, S. V. (2010). Intense and Reproducible $K\alpha$ Emissions from Micron-Sized Kr Cluster Target Irradiated with Intense Femtosecond Laser Pulses. *Japanese Journal of Applied Physics* **49**, 126401.
- [16] Hayashi, Y., Pirozhkov, A. S., Kando, M., Fukuda, Y., Faenov, A., Kawase, K., Pikuz, T., Nakamura, T., Kiriya, H., Okada, H., Bulanov, S. V. (2011). Efficient generation of Xe K-shell x rays by high-contrast interaction with submicrometer clusters. *Opt. Lett.* **36**, 1614–1616.
- [17] Kugland, N. L., Constantin, C. G., Neumayer, P., Chung, H.-K., Collette, A., Dewald, E. L., Froula, D. H., Glenzer, S. H., Kemp, A., Kritcher, A. L., Ross, J. S., Niemann, C. (2008). High $K\alpha$ x-ray conversion efficiency from extended source gas jet targets irradiated by ultra short laser pulses. *Appl. Phys. Lett.* **92**, 241504.
- [18] Parra, E., Alexeev, I., Fan, J., Kim, K. Y., McNaught, S. J., Milchberg, H. M. (2000). X-ray and extreme ultraviolet emission induced by variable pulse-width irradiation of Ar and Kr clusters and droplets. *Phys. Rev. E* **62**, R5931.

- [19] Junkel-Vives, G. C., Abdallah, Jr., J., Auguste, T., D'Oliveira, P., Hulin, S., Monot, P., Dobosz, S., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A. (2002). Spatially resolved x-ray spectroscopy investigation of femtosecond laser irradiated Ar clusters. *Phys. Rev. E* **65**, 036410.
- [20] Parra, E., McNaught, S. J., Fan, J., Milchberg, H. M. (2003). Pump-probe studies of EUV and X-ray emission dynamics of laser-irradiated noble gas droplets. *Appl. Phys. A* **77**, 317–323.
- [21] Fukuda, Y., Akahane, Y., Aoyama, M., Inoue, N., Ueda, H., Nakai, Y., Tsuji, K., Yamanaka, K., Hironaka, Y., Kishimura, H., Morishita, H., Kondo, K., Nakamura, K. G. (2004). Relativistic laser plasma from micron-sized argon clusters as a debris-free x-ray source for pulse x-ray diffraction. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5099–5101.
- [22] Hansen, S. B., Fournier, K. B., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu., Fukuda, Y., Akahane, Y., Aoyama, M., Inoue, N., Ueda, H., Yamakawa, K. (2005). Measurement of $2l - nl'$ x-ray transitions from $\approx 1 \mu\text{m}$ Kr clusters irradiated by high-intensity femtosecond laser pulses. *Phys. Rev. E* **71**, 016408.
- [23] Zhang, L., Chen, L.-M., Yuan, D.-W., Yan, W.-C., Wang, Zh.-H., Liu, C., Shen, Zh.-W., Faenov, A., Pikuz, T., Skobelev, I., Gasilov, V., Boldarev, A., Mao, J.-Y., Li, Y.-T., Dong, Q.-L., Lu, X., Ma, J.-L., Wang, W.-M., Sheng, Zh.-M., Zhang, J. (2011). Enhanced K_α output of Ar and Kr using size optimized cluster target irradiated by high-contrast laser pulses. *Optics Express* **19**, 25812–25822.
- [24] Chen, L. M., Yan, W. C., Li, D. Z., Hu, Z. D., Zhang, L., Wang, W. M., Hafz, N., Mao, J. Y., Huang, K., Ma, Y., Zhao, J. R., Ma, J. L., Li, Y. T., X. Lu, Sheng, Z. M., Wei, Z. Y., Gao, J., Zhang, J. (2013). Bright betatron X-ray radiation from a laser-driven-clustering gas target. *Sci. Rep.* **3**, 1912.
- [25] Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Kodama, R. (2016). Laser-Driven Particle Acceleration Towards Radiobiology and Medicine. In *High Resolution Ion and Electron Beam Radiography with Laser-Driven Clustered Sources*, Chapter 12. Heidelberg, New York: Springer.
- [26] Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Fukuda, Y., Kando, M., Kotaki, H., Homma, T., Kawase, K., Kameshima, T., Pirozhkov, A., Yogo, A., Tampo, M., Mori, M., Sakaki, H., Hayashi, Y., Nakamura, T.,

- Pikuz, Jr., S. A., Skobelev, I. Yu., Gasilov, S. V., Giulietti, A., Cecchetti, C. A., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A., Magunov, A., Kar, S., Borghesi, M., Bolton, P., Daido, H., Tajima, T., Kato, Y., Bulanov, S. V. (2009). Submicron ionography of nanostructures using a femtosecond-laser-driven-cluster-based source. *Appl. Phys. Lett.* **95**, 101107.
- [27] Fukuda, Y., Faenov, A. Y., Tampo, M., Pikuz, T. A., Nakamura, T., Kando, M., Hayashi, Y., Yogo, A., Sakaki, H., Kameshima, T., Pirozhkov, A. S., Ogura, K., Mori, M., Esirkepov, T. Z., Koga, J., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A., Magunov, A. I., Yamauchi, T., Kodama, R., Bolton, P. R., Kato, Y., Tajima, T., Daido, H., Bulanov, S. V. (2009). Energy Increase in Multi-MeV Ion Acceleration in the Interaction of a Short Pulse Laser with a Cluster-Gas Target. *Phys. Rev. Lett.* **103**, 165002.
- [28] Fukuda, Y., Sakaki, H., Kanasaki, M., Yogo, A., Jinno, S., Tampo, M., Faenov, A., Pikuz, T., Hayashi, Y., Kando, M., Pirozhkov, A., Shimomura, T., Kiriya, H., Kurashima, S., Kamiya, T., Oda, K., Yamauchi, T., Kondo, K., Bulanov, S. (2013). Identification of high energy ions using backscattered particles in laser-driven ion acceleration with cluster-gas targets. *Radiat. Meas.* **50**, 92–96.
- [29] Добош, С., Шмидт, М., Пердрикс, М., Мернадьер, П., Гоберт, О., Норманд, Д., Фаенов, А. Я., Магунов, А. И., Пикюз, Т. А., Скобелев, И. Ю., Андреев, Н. Е. (1998). Особенности рентгеновских спектров плазмы, образующейся при нагреве CO_2 кластеров высокоинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами с $\lambda = 0.8$ и 0.4 мкм. *Письма в ЖЭТФ* **68**, 454–459.
- [30] Добош, С., Шмидт, М., Пердрикс, М., Мейнадие, П., Гобер, О., Норман, Д., Эллерт, К., Бленски, Т., Фаенов, А. Я., Магунов, А. И., Пикюз, Т. А., Скобелев, И. Ю., Андреев, Н. Е. (1999). Наблюдение ионов с энергиями свыше 100 кэВ, образующихся при взаимодействии 60 фс лазерного импульса с кластерами. *ЖЭТФ* **115**, 2051–2066.
- [31] Bussolino, G. C., Faenov, A., Giulietti, A., Giulietti, D., Koester, P., Labate, L., Levato, T., Pikuz, T., Gizzi, L. A. (2013). Electron radiography using a table-top laser-cluster plasma accelerator. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 245501.
- [32] Koester, P., Bussolino, G. C., Cristoforetti, G., Faenov, A., Giulietti, A., Giulietti, D., Labate, L., Levato, T., Pikuz, T., Gizzi, L. A. (2015). High-charge divergent electron beam generation from high-intensity laser interaction with a gas-cluster target. *Laser and Particle Beams* **33**, 331–338.

- [33] Zhang, L., Chen, L.-M., Wang, W.-M., Yan, W.-C., Yuan, D.-W., Mao, J.-Y., Wang, Zh.-H., Liu, C., Shen, Zh.-W., Li, Y.-T., Dong, Q.-L., Lu, X., Ma, J.-L., Faenov, A., Pikuz, T., Sheng, Z.-M., Zhang, J. (2012). Electron acceleration via high contrast laser interacting with submicron clusters. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 014104.
- [34] Hagena, O. F. (1992). Cluster ion sources. *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 2374.
- [35] Kim, K. Y., Kumarappan, V., Milchberg, H. M. (2003). Measurement of the average size and density of clusters in a gas jet. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3210–3212.
- [36] Tao, Y., Hagmeijer, R., van der Weide, E. T. A., Bastiaens, H. M. J., Boller, K.-J. (2016). Revisiting argon cluster formation in a planar gas jet for high-intensity laser matter interaction. *Appl. Phys.* **119**, 164901.
- [37] Dorchies, F., Blasco, F., Caillaud, T., Stevefelt, J., Stenz, C., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A. (2003). Spatial distribution of cluster size and density in supersonic jets as targets for intense laser pulses. *Phys. Rev. A* **68**, 023201.
- [38] Jinno, S., Fukuda, Y., Sakaki, H., Yogo, A., Kanasaki, M., Kondo, K., Faenov, A. Ya., Skobelev, I. Yu., Pikuz, T. A., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A. (2013). Mie scattering from submicron-sized CO₂ clusters formed in a supersonic expansion of a gas mixture. *Optics Express* **21**, 20656–20674.
- [39] Jinno, S., Fukuda, Y., Sakaki, H., Yogo, A., Kanasaki, M., Kondo, K., Faenov, A. Ya., Skobelev, I. Yu., Pikuz, T. A., Boldarev, A. S., Gasilov, V. A. (2013). Characterization of submicron-sized CO₂ clusters formed with a supersonic expansion of a mixed-gas using a three-staged nozzle. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 164103.
- [40] Boldarev, A. S., Gasilov, V. A., Faenov, A. Ya., Fukuda, Y., Yamakawa, K. (2006). Gas-cluster targets for femtosecond laser interaction: Modeling and optimization. *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 083112.
- [41] Болдарев, А. С., Гасилов, В. А., Фаенов, А. Я. (2004). О генерации крупных кластеров при формировании газоструйных лазерных мишеней. *Журнал Технической Физики* **74**, 10–17.
- [42] Rusek, M., Lagadec, H., Blenski, T. (2000). Cluster explosion in an intense laser pulse: Thomas-Fermi model. *Phys. Rev. A* **63**, 013203.

- [43] Blasco, F., Stenz, C., Salin, F., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu. (2001). Portable, tunable, high-luminosity spherical crystal spectrometer with an x-ray charge coupled device, for high-resolution x-ray spectromicroscopy of clusters heated by femtosecond laser pulses. *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 1956.
- [44] Болдарев, А. С., Гасилов, В. А., Бласко, Ф., Стенц, К., Дорши, Ф., Салин, Ф., Фаенов, А. Я., Пикуз, Т. А., Магунов, А. И., Скобелев, И. Ю. (2001). О моделировании кластерных струй как мишеней для взаимодействия с мощным сверхкоротким лазерным излучением. *Письма в ЖЭТФ* **73**, 583–587.
- [45] Скобелев, И. Ю., Фаенов, А. Я., Магунов, А. И., Пикуз, Т. А., Болдарев, А. С., Гасилов, В. А., Абдаллах, Дж. мл., Джанкел-Вивс, Г., Огюсте, Т., Добош, С., д’Оливейра, П., Юлэн, С., Моно, П., Бласко, Ф., Дорчес, Ф., Кайо, Т., Бонт, К., Стенц, К., Салэн, Ф., Лобода, П. А., Литвиненко, И. А., Попова, В. В., Байдин, Г. В., Шарков, Б. Ю. (2002). Рентгеноспектральная диагностика плазмы, создаваемой при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с кластерной мишенью. *ЖЭТФ* **121**, 1124–1138.
- [46] Скобелев, И. Ю., Фаенов, А. Я., Магунов, А. И., Пикуз, Т. А., Болдарев, А. С., Гасилов, В. А., Абдаллах, Дж. мл., Джанкел-Вивс, Г., Аугусте, Т., д’Оливейра, П., Хулин, С., Моно, П., Бласко, Ф., Дорчес, Ф., Каилло, Т., Бонте, К., Стенц, К., Салин, Ф., Шарков, Б. Ю. (2002). О взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с кластерными мишенями. *ЖЭТФ* **121**, 88–101.
- [47] Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu., Giulietti, D., Betti, S., Galimberti, M., Gamucci, A., Giulietti, A., Gizzi, L. A., Labate, L., Levato, T., Tomassini, P., Marques, J. R., Bourgeois, N., Dobosz-Dufrenoy, S., Ceccoti, T., Monot, P., Reau, F., Popescu, H., D’Oliveira, P., Martin, Ph., Fukuda, Y., Boldarev, A. S., Gasilov, S. V., Gasilov, V. A. (2008). Non-adiabatic cluster expansion after ultrashort laser interaction. *Laser and Particle Beams* **26**, 69–82.
- [48] Colgan, J., Abdallah, Jr., J., Faenov, A. Ya., Pikuz, T. A., Skobelev, I. Yu., Fukuda, Y., Hayashi, Y., Pirozhkov, A., Kawase, K., Shimomura, T., Kiriyaama, H., Kato, Y., Bulanov, S. V., Kando, M. (2011). Observation and modeling of high resolution spectral features of the inner-shell X-ray emission produced by 10^{-10} contrast femtosecond-pulse laser irradiation of argon clusters. *High Energy Density Physics* **7**, 77–83.

- [49] Faenov, A. Ya., Skobelev, I. Yu., Pikuz, T. A., Pikuz, S. A., Fortov, V. E., Fukuda, Y., Hayashi, Y., Pirozhkov, A., Kotaki, H., Shimomura, T., Kiriya, H., Kanazawa, S., Kato, Y., Colgan, J., Abdallah, J., Kando, M. (2012). X-ray spectroscopy diagnoses of clusters surviving under prepulses of ultra-intense femtosecond laser pulse irradiation. *Laser and Particle Beams* **30**, 481–488.
- [50] Oks, E., Dalimier, E., Faenov, A. Ya., Pikuz, T., Fukuda, Y., Jinno, S., Sakaki, H., Kotaki, H., Pirozhkov, A., Hayashi, Y., Skobelev, I., Kawachi, T., Kando, M., Kondo, K. (2014). Two-plasmon decay instability's signature in spectral lines and spectroscopic measurements of charge exchange rate in a femtosecond laser-driven cluster-based plasma. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **47**, 221001.
- [51] 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. (2015). Revealing the second harmonic generation in a femtosecond laser-driven cluster-based plasma by analyzing shapes of Ar XVII spectral lines. *Optics Express* **23**, 31991–32005.
- [52] Ditmire, T., Donnelly, T., Rubenchik, A. M., Falcone, R. W., Perry, M. D. (1996). Interaction of intense laser pulses with atomic clusters. *Phys. Rev. A* **53**, 3379.
- [53] Ditmire, T., Tisch, J. W. G., Springate, E., Mason, M. B., Hay, N., Marangos, J. P., Hutchinson, M. H. R. (1997). High Energy Ion Explosion of Atomic Clusters: Transition from Molecular to Plasma Behavior. *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2732.
- [54] Ditmire, T., Gumbrell, E. T., Smith, R. A., Djaoui, A., Hutchinson, M. H. R. (1998). Time-Resolved Study of Nonlocal Electron Heat Transport in High Temperature Plasmas. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 720.
- [55] Tajima, T., Kishimoto, Y., Downer, M. C. (1999). Optical properties of cluster plasma. *Phys. Plasmas* **6**, 3759.
- [56] Faenov, A. Y., Skobelev, I. Y., Magunov, A. I., Pikuz, T. A., Abdallah, Jr., J., Junkel-Vives, G. C., Blasco, F., Dorchiev, F., Stenz, C., Salin, F., Auguste, T., Dobosz, S., Monot, P., D'Oliveira, P., Hulin, S., Boldarev, A., Gasilov, V. A. (2001). X-ray radiation properties of clusters heated by fs laser pulses. *Proc. SPIE* **4504**, 121–132.

- [57] Gavrilenko, V. P., Faenov, A. Ya., Magunov, A. I., Skobelev, I. Yu., Pikuz, T. A., Kim, K. Y., Milchberg, H. M. (2006). Observation of modulations in Lyman- α line profiles of multicharged ions in clusters irradiated by femtosecond laser pulses: Effect of a dynamic electric field. *Phys. Rev. A* **73**, 013203.
- [58] Davis, J., Petrov, J. M., Velikovich, A. (2007). Nonlinear energy absorption of rare gas clusters in intense laser field. *Phys. Plasmas* **14**, 060701.
- [59] Faenov, A. Ya., Oks, E., Dalimier, E., Skobelev, I. Yu., Pikuz, S. A., Pikuz, T. A., Zhvaniya, I. A., Fukuda, Y., Andreev, A., Koga, J., Sakaki, H., Kotaki, H., Pirozhkov, A. S., Hayashi, Y., Kawachi, T., Kando, M., Kondo, K., Zhidkov, A. G., Kodama, R. (2016). X-ray spectral diagnostics of laser harmonic generation in the interaction of relativistic femtosecond laser pulses with clusters. *Quantum Electronics* **46**, 338–341.
- [60] Болдарев, А. С., Гасилов, В. А. (2003). Математическое моделирование образования кластерных мишеней. *Математическое моделирование* **15**, 55–73.
- [61] Abraham, F. F. (1974). *Homogeneous nucleation theory*. New York: Academic.
- [62] Френкель, Я. И. (1975). *Кинетическая теория жидкостей*. Ленинград: Наука.

Содержание

1	Введение	3
2	Математическая модель кластеризации в сопловых течениях бинарных смесей	5
3	Экспериментальная верификация модели	7
4	Заключение	13