



Развитие методов исследования плазменного кильватерного ускорения с лазерным драйвером тераватного уровня мощности

Доклад по материалам диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Соискатель:
Туев Пётр Викторович

Научный руководитель:
Лотов Константин Владимирович
д.ф.-м.н., профессор РАН

Структура

Диссертации состоит из:

- Введения, в котором кратко изложены основные принципы кильватерного ускорения и причины научного интереса к тераваттным драйверам, а также цели и задачи работы.
- Пяти глав:
 - Первая посвящена новому методу восстановления плотности сверхзвуковой газовой струи с большой устойчивостью к шумам.
 - Во второй сравниваются методы расширения квазистатического приближения, позволяющие учитывать захват плазменных электронов кильватерной волной.
 - Третья посвящена оптимизации параметров взаимодействия лазера тераваттного уровня мощности с плазмой для обеспечения устойчивого формирования ускоренного пучка.
 - В четвертой представлена новая модель описания плазмы на основе квазистатического приближения для моделирования кильватерного ускорения
 - В пятой главе обсуждается возможность увеличения длины взаимодействия лазерного излучения с плазмой по средствам его каналирования в металлическом капилляре.
- Заключение

План выступления

- **Введение**
- Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи
- Вторая глава: модификация квазистатического приближения
- Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия
- Четвертая глава: новая модель описания плазмы
- Пятая глава: каналирование лазерного излучения
- Заключение

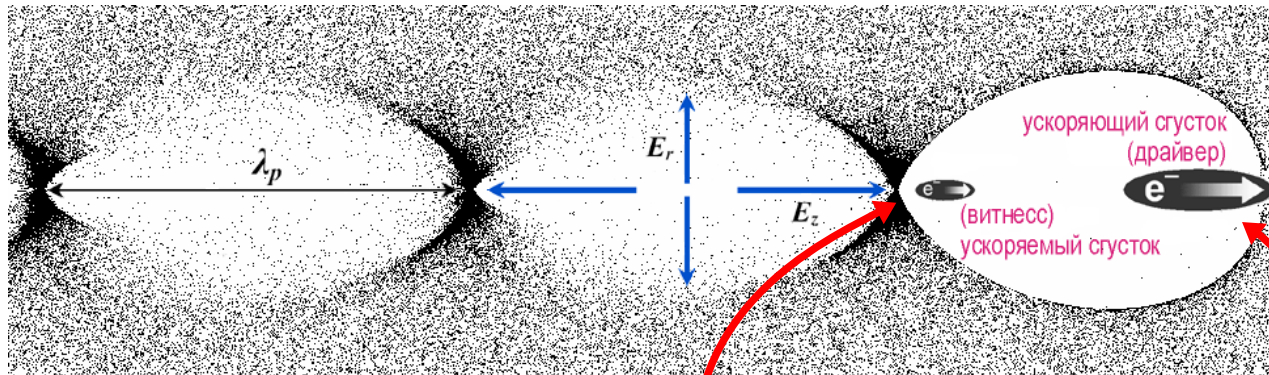
Кильватерное ускорение

Плотность плазмы $n_0 \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Времена $\sim \omega_p^{-1} = (4\pi n_0 e^2 / m)^{-1/2} \sim 10 \text{ фсек}$

Размеры сгустков $\sim c / \omega_p \sim 1 \text{ мкм}$

Поля $\sim E_0 = (4\pi n_0 m c^2)^{1/2} \sim 100 \text{ ГВ/м}$

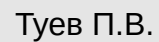


+

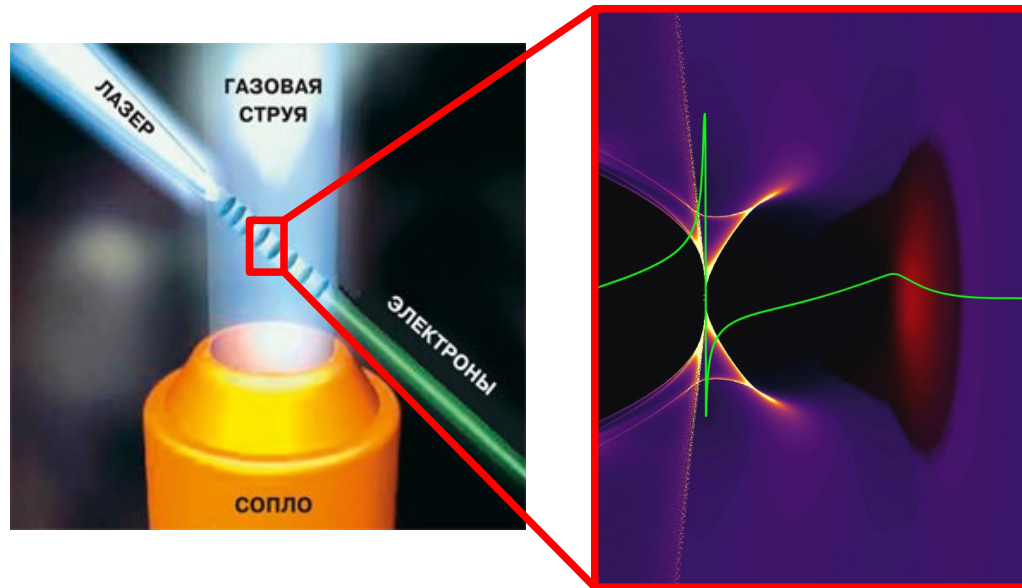


=





Лазерное кильватерное ускорение



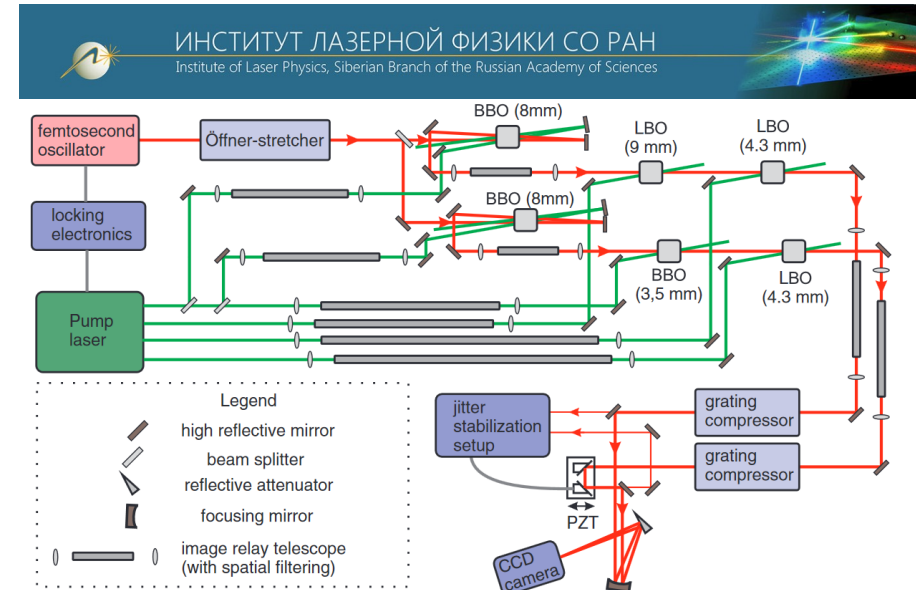
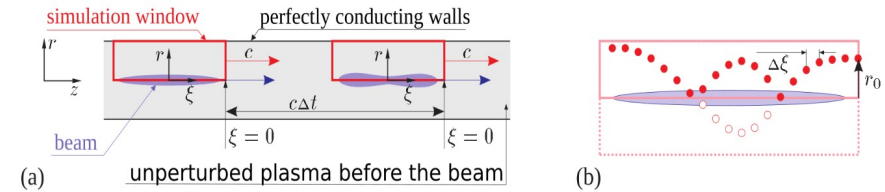
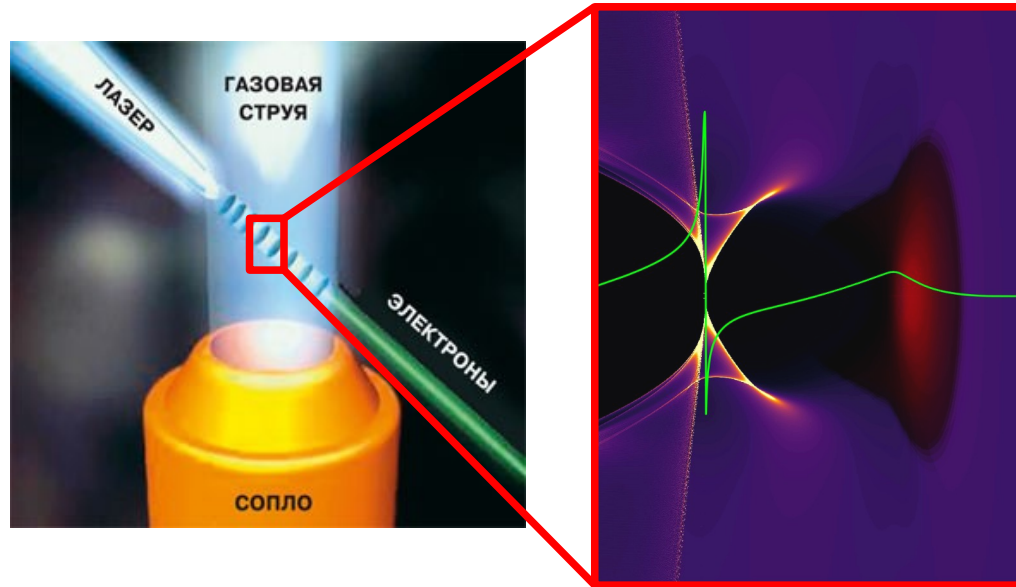
Захват электронов плазмы
+
Относительно простой эксперимент
=
Компактный источник пучков

Лазерное кильватерное ускорение



Институт ядерной физики
имени Г. И. Будкера СО РАН

LCODE



Цель и задачи

Цель: разработать эффективные методы исследования кильватерного ускорения и с их помощью оптимизировать параметры взаимодействия лазерного импульса средней интенсивности с плазмой в режиме захвата плазменных электронов, а также проанализировать возможность более эффективной передачи энергии импульса ускоряемым частицам.

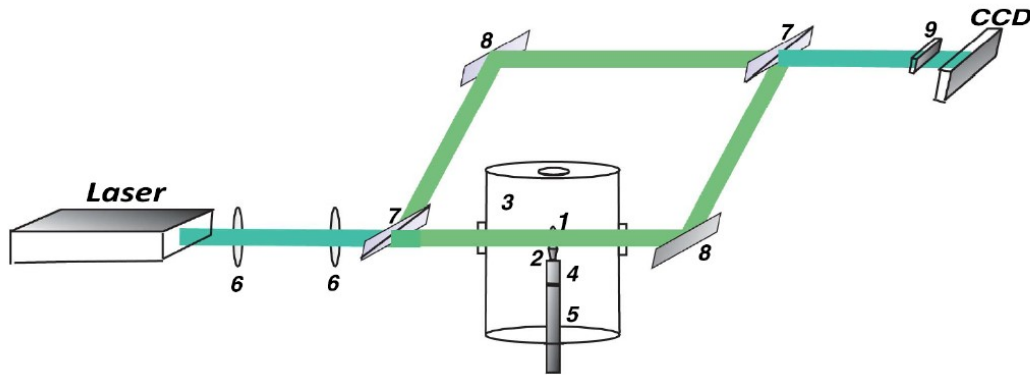
Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

- 1) Разработать инструмент для исследования и исследовать параметры сверхзвуковой газовой струи
- 2) Модернизировать квазистатический код LCODE, добавив возможность моделировать кильватерные волны с сильной нелинейностью
- 3) Оптимизировать параметры лазер-плазменного взаимодействия для обеспечения генерации электронных сгустков
- 4) Проанализировать возможность каналирования лазерного излучения в металлическом капилляре для увеличения длины ускорения

План выступления

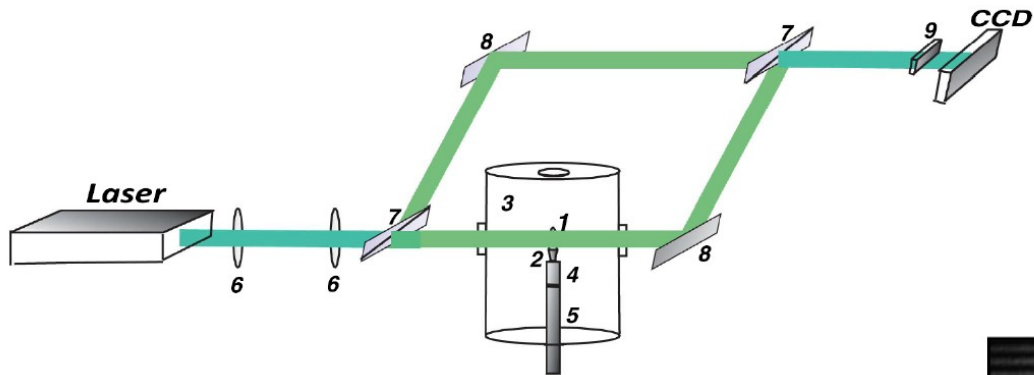
- Введение
- **Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи**
- Вторая глава: модификация квазистатического приближения
- Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия
- Четвертая глава: новая модель описания плазмы
- Пятая глава: каналирование лазерного излучения
- Заключение

Интерференционные измерения



Давление в вакуумной камере: 10^{-3} бар
 Время срабатывание импульсного клапана: 1.7 мс
 Диагностический лазер Nd-YAG с длиной волны 532 нм
 Сопло Лавалья: диаметр перетяжки 350 мкм
 выходной диаметр 1.5 мм
 угол выхода 14 градусов

Интерференционные измерения



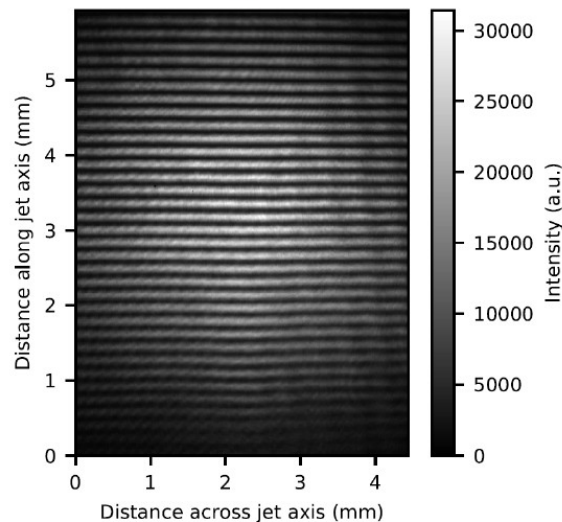
$$g(y, z) = p(y, z) + c(y, z)e^{2\pi i f_0 z} + \overline{c(y, z)}e^{-2\pi i f_0 z}$$

$$\Phi(y, z) = \arctan \frac{\text{Im}[c(y, z)]}{\text{Re}[c(y, z)]}$$

Давление в вакуумной камере: 10^{-3} бар
 Время срабатывание импульсного клапана: 1.7 мс
 Диагностический лазер Nd-YAG с длиной волны 532 нм
 Сопло Лавалья: диаметр перетяжки 350 мкм
 выходной диаметр 1.5 мм
 угол выхода 14 градусов

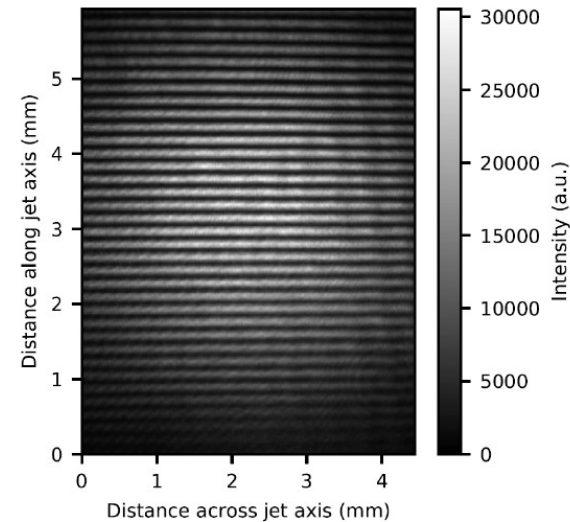
Сигнал

(a)



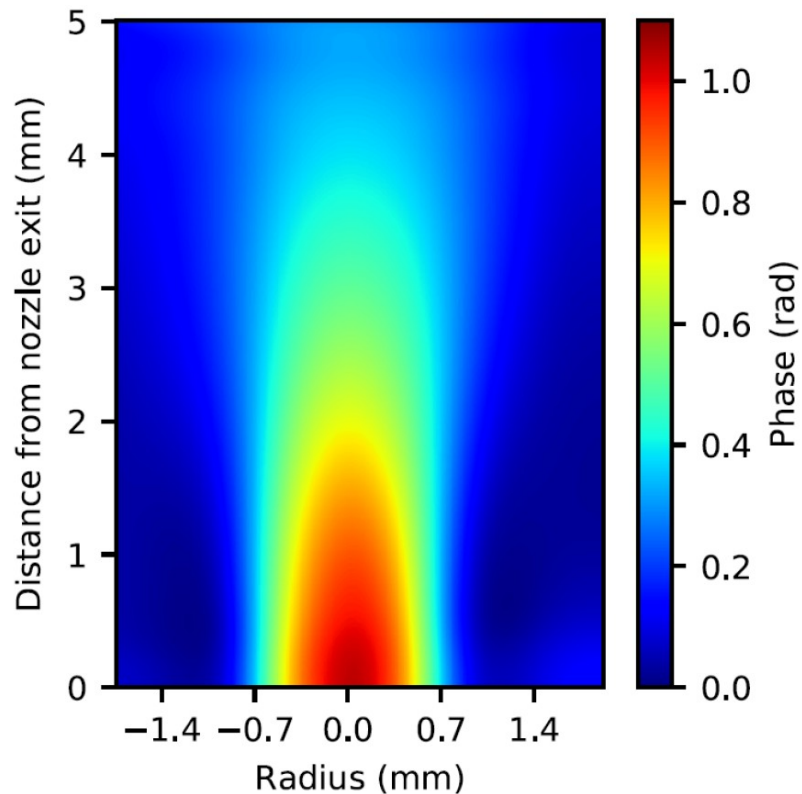
Фон

(b)



Усредненное распределение фазы
по пяти измерениям

(a)

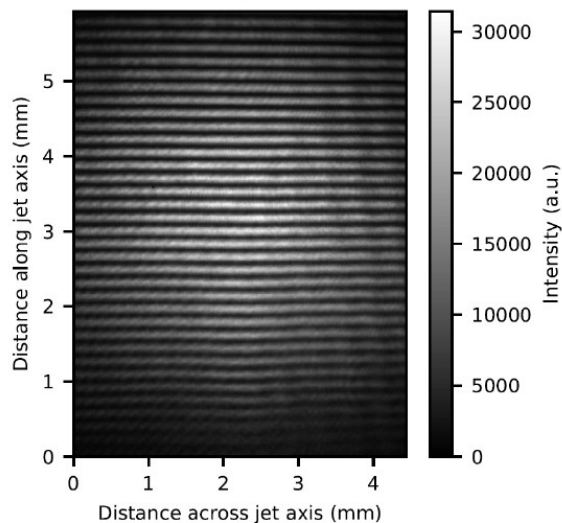


$$g(y, z) = p(y, z) + c(y, z)e^{2\pi i f_0 z} + \overline{c(y, z)}e^{-2\pi i f_0 z}$$

$$\Phi(y, z) = \arctan \frac{\Im[c(y, z)]}{\Re[c(y, z)]}$$

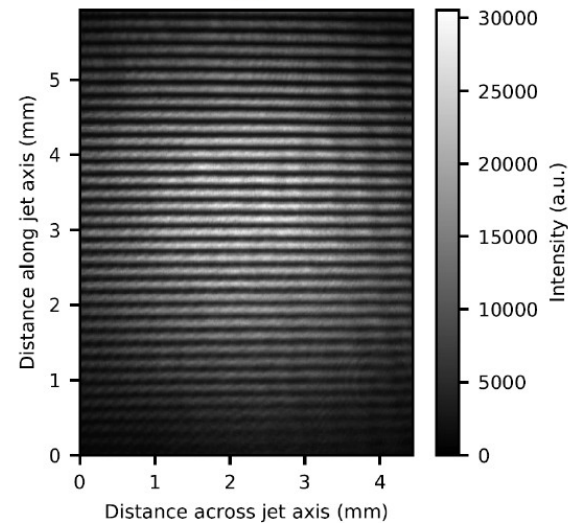
Сигнал

(a)



Фон

(b)



Восстановление плотности

$$\Phi(y, z) = \frac{4\pi}{\lambda_d} \int_y^{r_0} \frac{(N(r, z) - 1)r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr$$

$$N - 1 = \alpha n$$

$$n(r, z) = n_1(z)n_2(r)$$

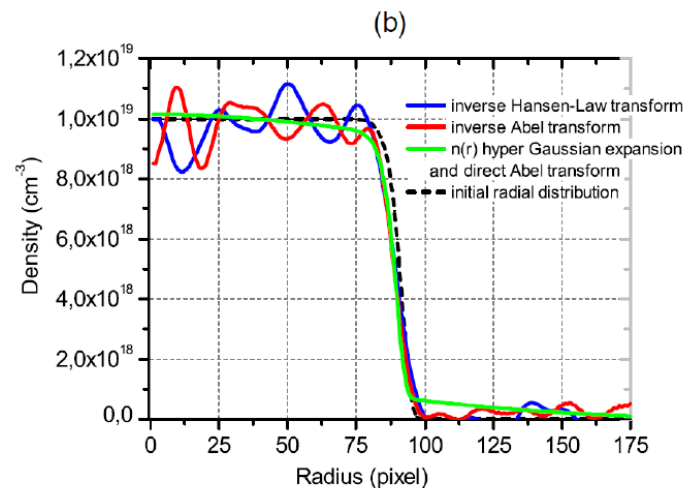
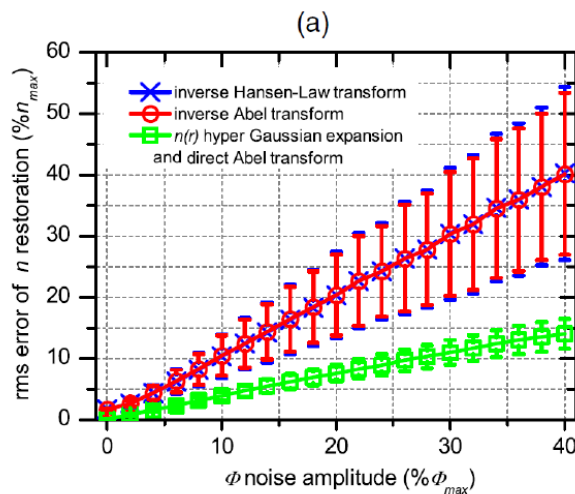
$$n_2(r) \approx \sum_{i=2}^{M_1} \sum_{j=2}^{M_2} C_i^j \exp[-(r/\sigma_j)^i]$$

Цилиндрическая симметрия

Факторизация плотности

Плотность — монотонная функция от радиуса

Меньшая величина ошибки -
более устойчивое восстановление

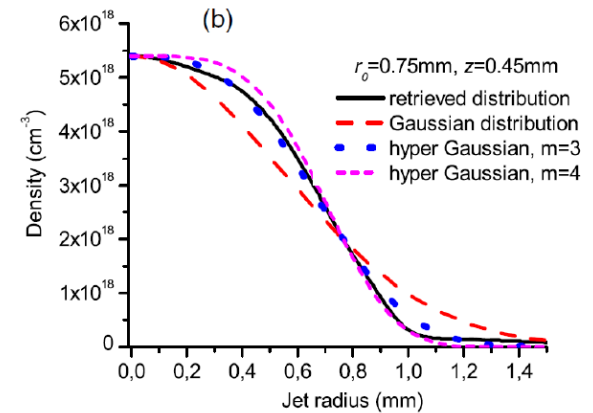
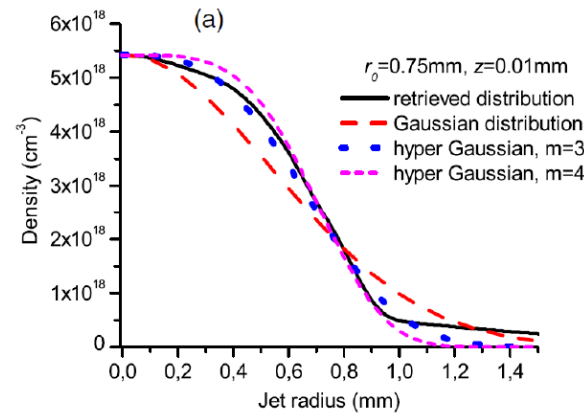
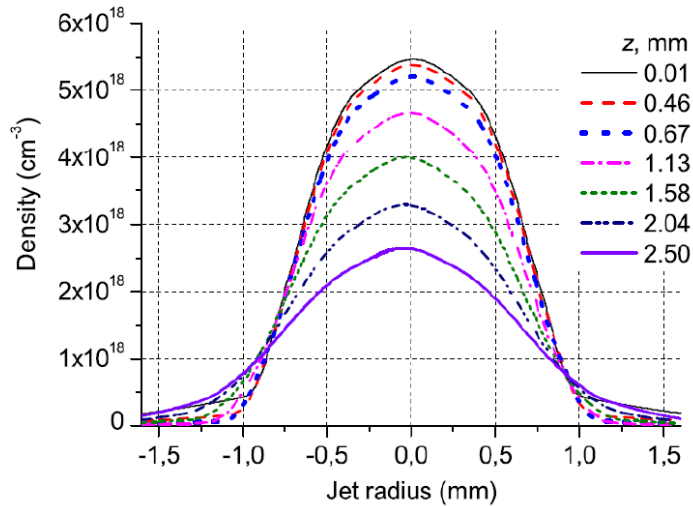


Восстановление плотности

Сверхзвуковое течение газа

На расстоянии до 0.7 мм от сопла профиль плотности не изменяется

Область квазиоднородной плотности ~ 0.8 мм

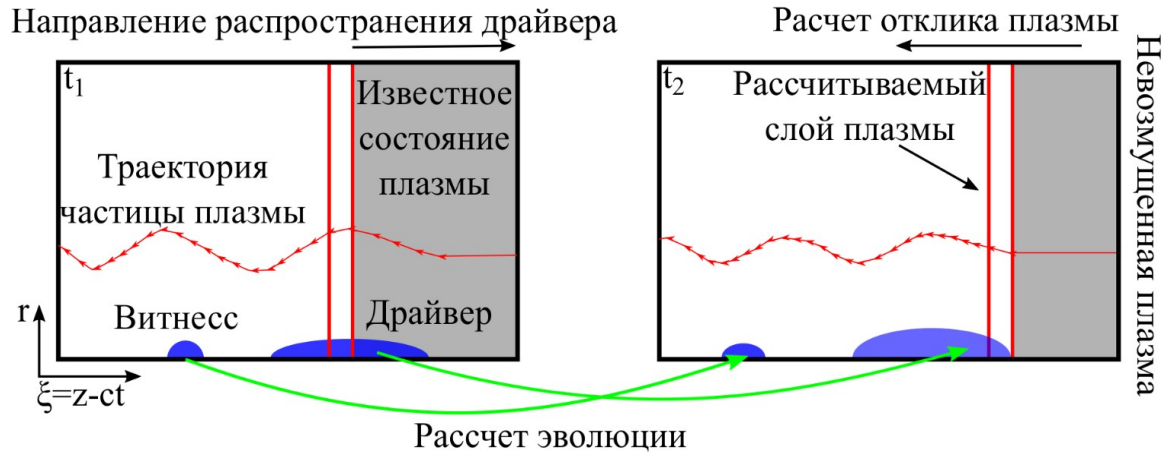


S.V. Avtaeva, K.V. Gubin, V.I. Trunov, and P.V. Tuev, Algorithm for supersonic gas jet density profile retrieval from interferometric measurement, Journal of the Optical Society of America A 36, 5, pp. 910-917 (2019)

План выступления

- Введение
- Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи
- **Вторая глава: модификация квазистатического приближения**
- Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия
- Четвертая глава: новая модель описания плазмы
- Пятая глава: каналирование лазерного излучения
- Заключение

Квазистатистическое приближение

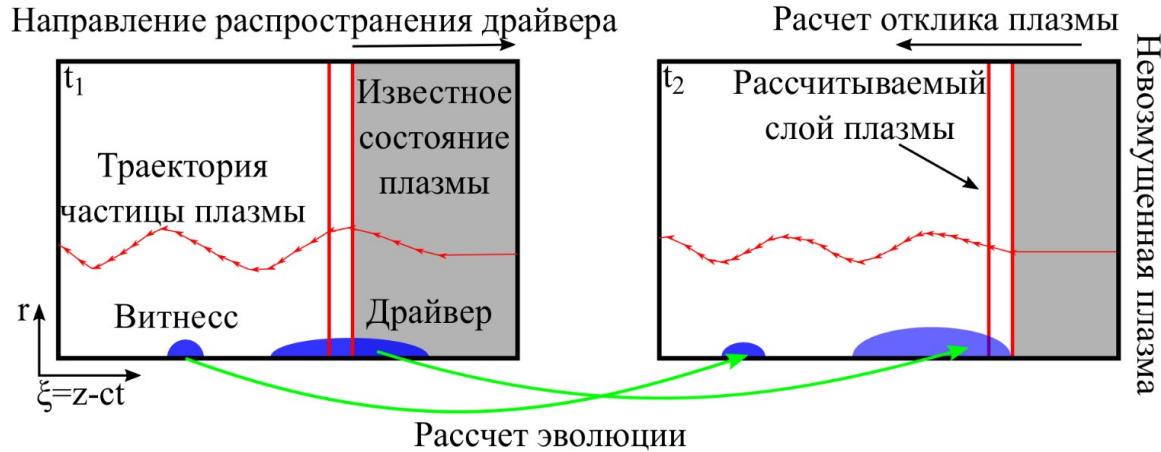


$$\frac{\partial}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi}$$

$$\frac{d\vec{p}_p}{d\xi} = \frac{d\vec{p}_p}{dt} \frac{dt}{d\xi} = \frac{q_p}{v_{zp} - 1} \left(\vec{E} + [\vec{v}_p \times \vec{B}] \right)$$

$$\vec{v}_p = \frac{\vec{p}_p}{\sqrt{M_p^2 + p_p^2}} \quad \frac{dr_p}{d\xi} = \frac{v_{zp}}{v_{zp} - 1}$$

Квазистатическое приближение



Захват $\Leftrightarrow \xi = \text{const}, z \neq \text{const}$

Можно использовать модель движения частиц пучка:

$$\frac{d\vec{p}_b}{dt} = q_b \vec{E} + q_b [\vec{v}_b \times \vec{B}]$$

$$\vec{v}_b = \frac{\vec{p}_b}{\sqrt{m_b^2 + p_b^2}}$$

$$\frac{dr_b}{dt} = v_{br}$$

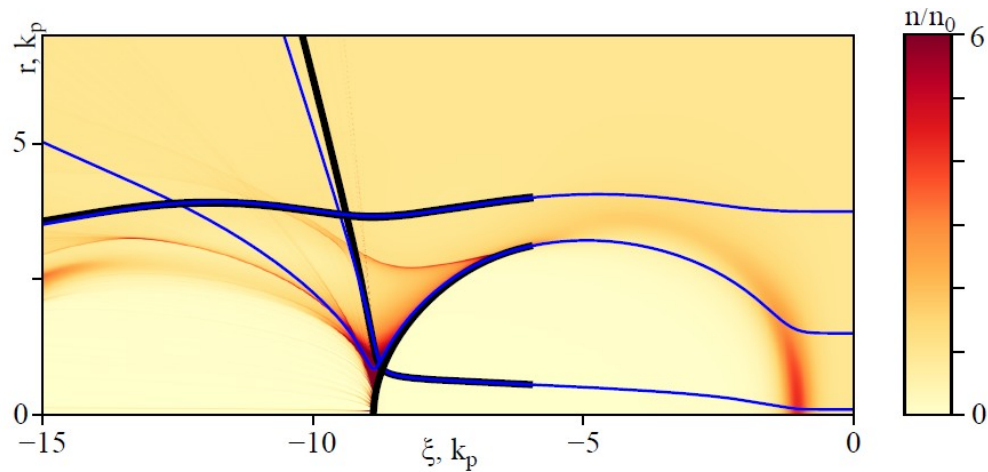
$$\frac{d\xi_b}{dt} = v_{bz} - 1$$

$$\frac{d\vec{p}_p}{d\xi} = \frac{d\vec{p}_p}{dt} \frac{dt}{d\xi} = \frac{q_p}{v_{zp} - 1} \left(\vec{E} + [\vec{v}_p \times \vec{B}] \right)$$

$$\vec{v}_p = \frac{\vec{p}_p}{\sqrt{M_p^2 + p_p^2}}$$

$$\frac{dr_p}{d\xi} = \frac{v_{zp}}{v_{zp} - 1}$$

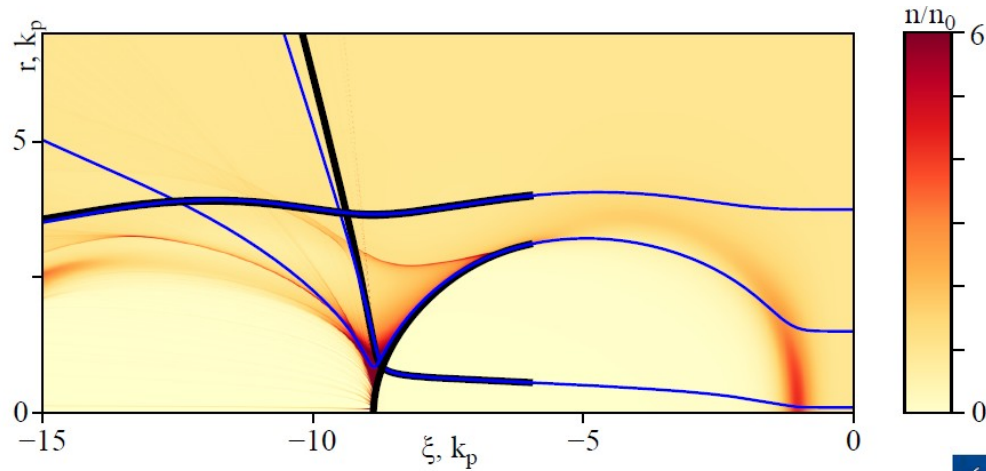
Захват пробных частиц



Синие линии вычислены в квазистатическом приближении
Черные линии — без использования приближений

Можно дублировать слой плазмы пробными частицами на некотором ξ

Захват пробных частиц



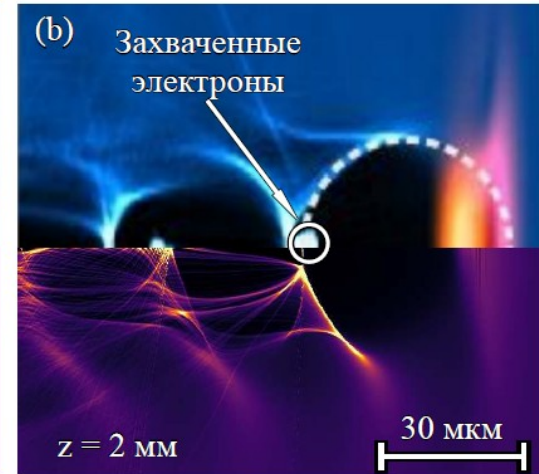
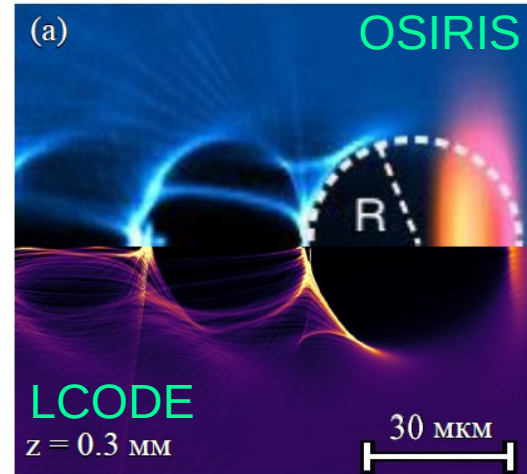
Синие линии вычислены в квазистатическом приближении
Черные линии — без использования приближений

Можно дублировать слой плазмы пробными частицами на некотором ξ

Тогда нет учета влияния пространственного заряда на волну

Нужно наделять частицы зарядом сразу

П.В. Туев, А.П. Соседкин, К.В. Лотов // Формирование ускоряемого сгустка из электронов плазмы при моделировании кильватерного ускорения квазистатическим кодом // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 4. С. 14–19.



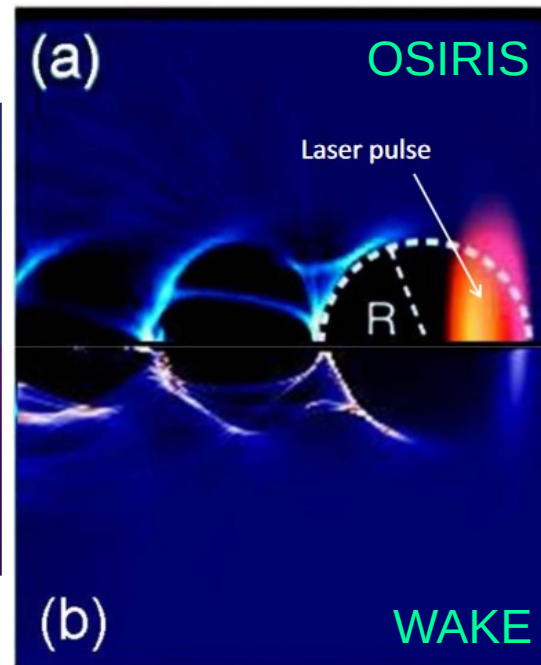
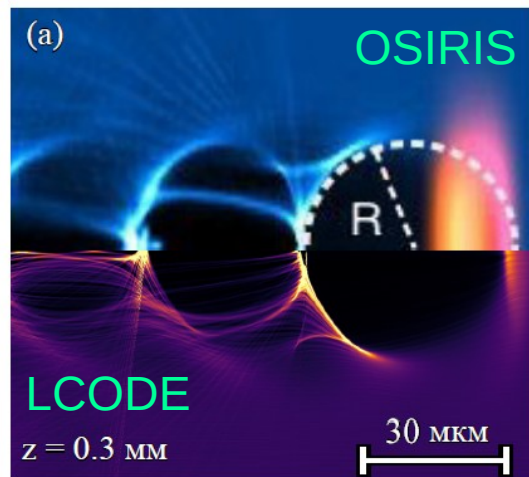
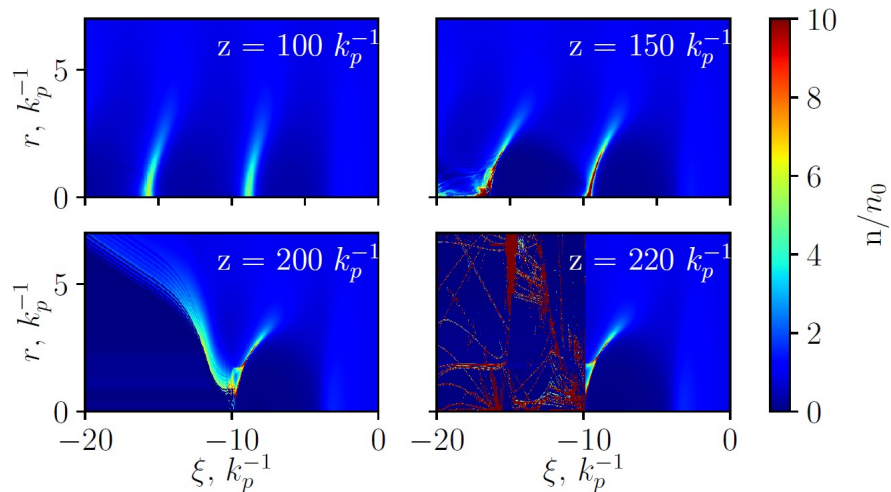
Захват частиц

Ограничения для смены модели*:

1. Энергия ($\gamma > 1.2$)
2. Пересечение оси

*WAKE-code team: PHYSICS OF PLASMAS 17, 063106 (2010)

Your branches		
plasma_delay_collective	Updated last month by Korsidar	47:35
plasma_delay	Updated 4 months ago by Korsidar	47:34
trapping	Updated 13 months ago by nikolaiM	47:32
wake_like_phantom	Updated 12 months ago by Korsidar	47:31
wake_like	Updated 13 months ago by Korsidar	47:30
collectiv_path_lin	Updated 13 months ago by Korsidar	47:28
beam_down_trap	Updated 13 months ago by Korsidar	47:29
field_correction_trapping	Updated 14 months ago by Korsidar	47:27
path_lin	Updated 14 months ago by Korsidar	47:26
forecast	Updated 15 months ago by Korsidar	47:26
compiling_halfbaked	Updated 2 years ago by Korsidar	58:1

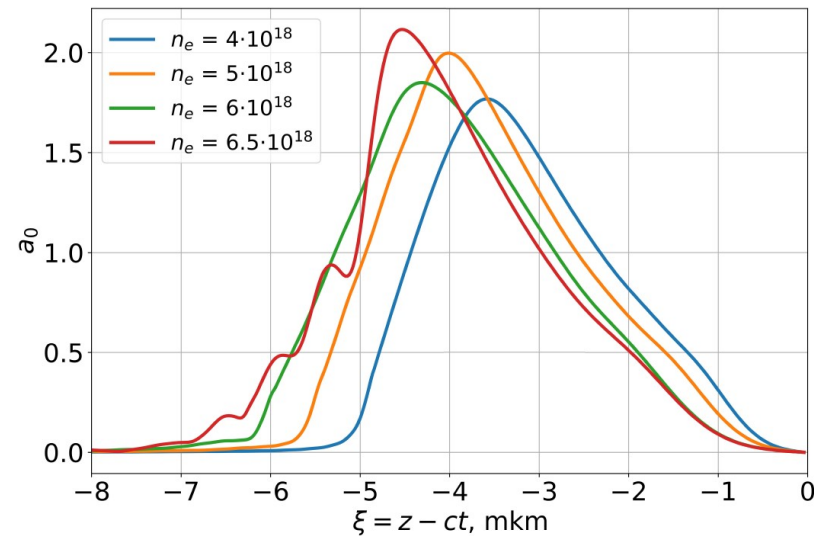
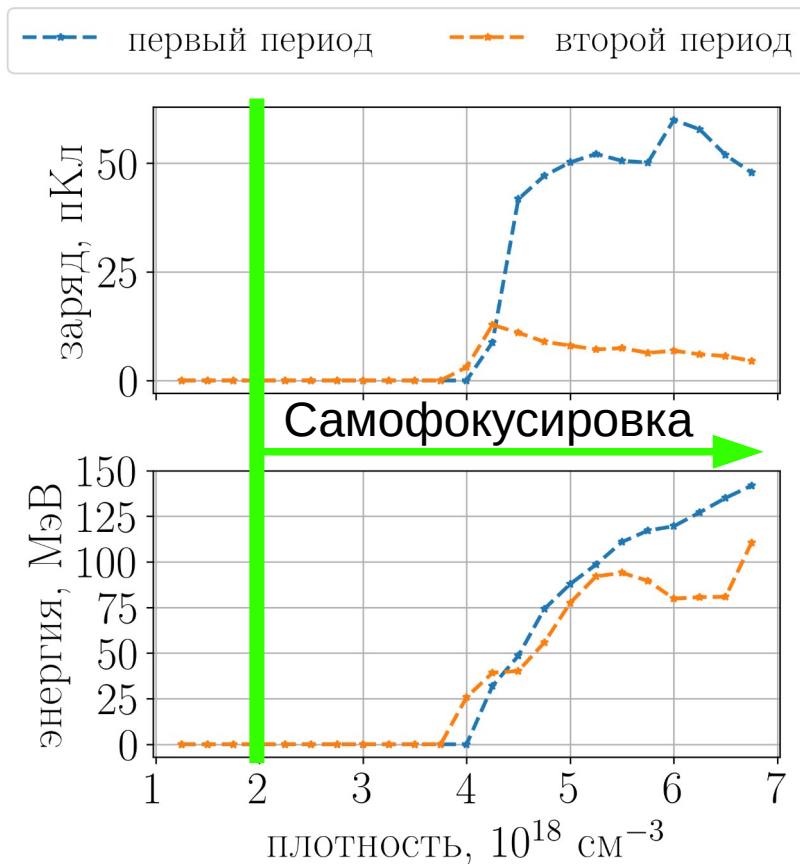


План выступления

- Введение
- Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи
- Вторая глава: модификация квазистатического приближения
- **Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия**
- Четвертая глава: новая модель описания плазмы
- Пятая глава: каналирование лазерного излучения
- Заключение

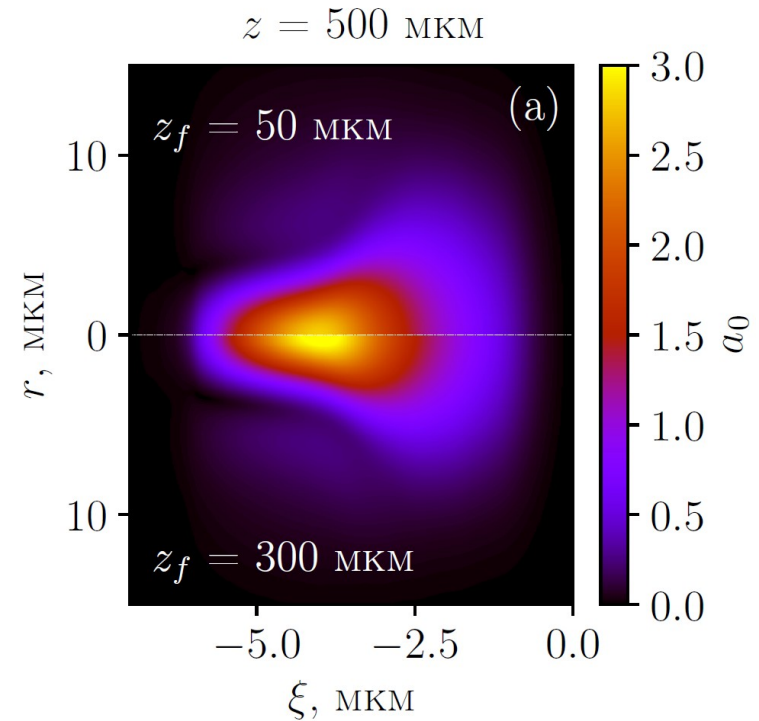
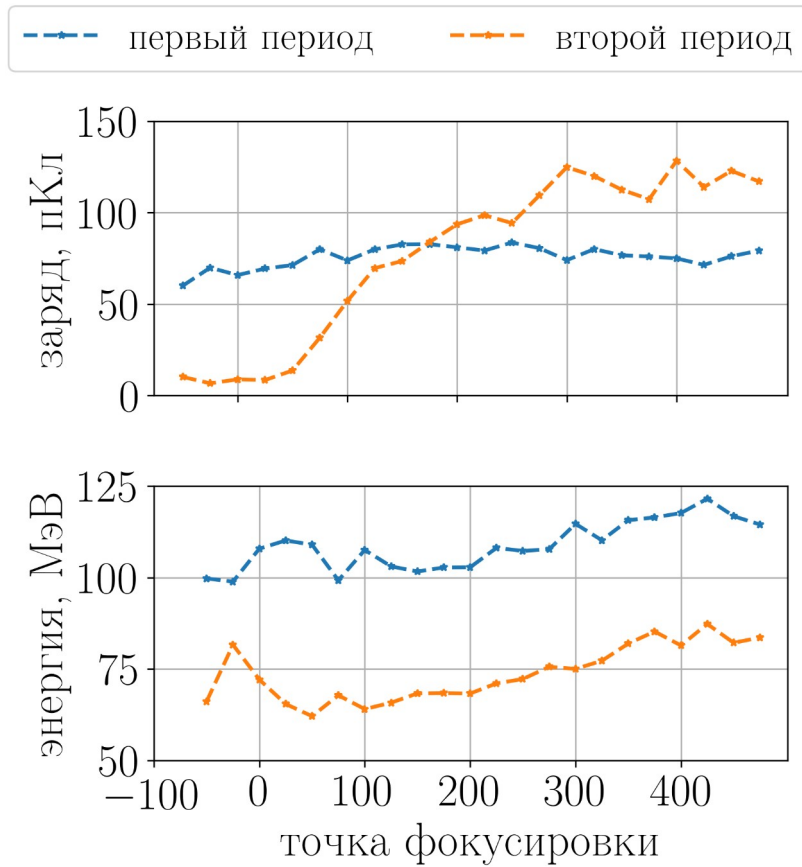
Сканирование плотности плазмы

Огибающая лазерного импульса после 1 мм взаимодействия с плазмой



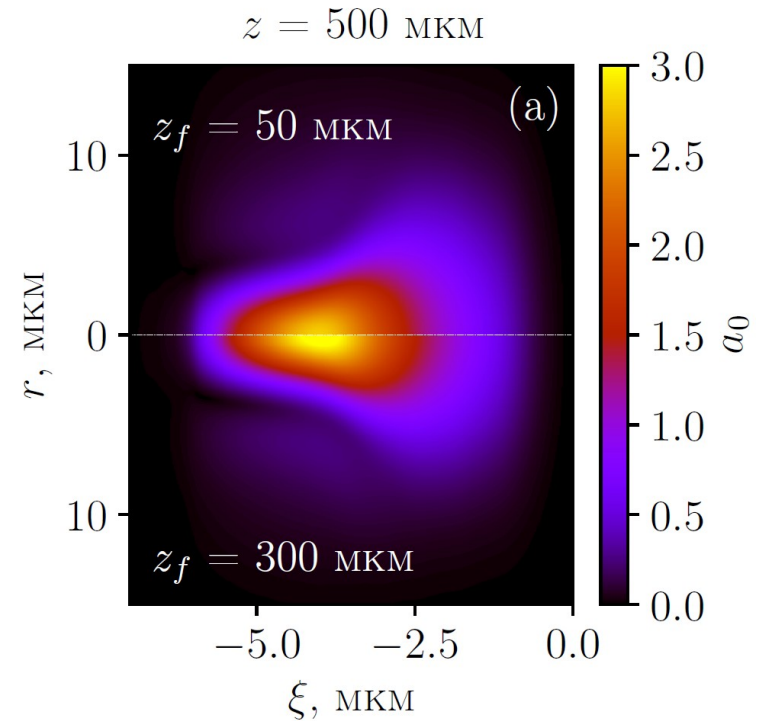
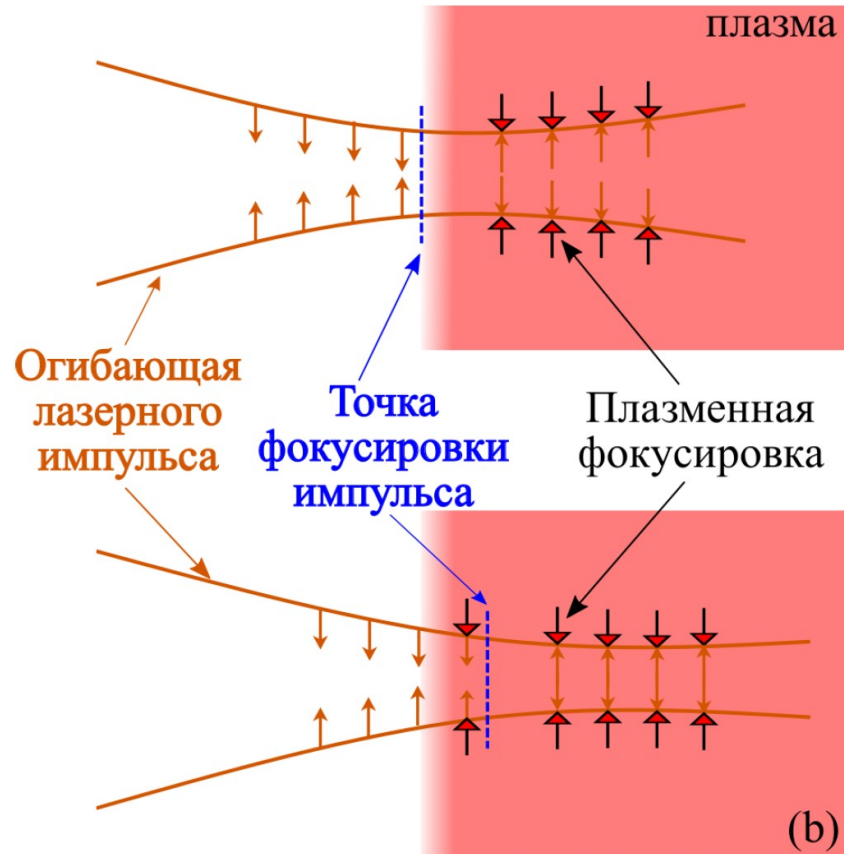
Плазма с плотностью выше $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ разрушает лазерный импульс до конца взаимодействия

Распределение интенсивности лазерного излучения

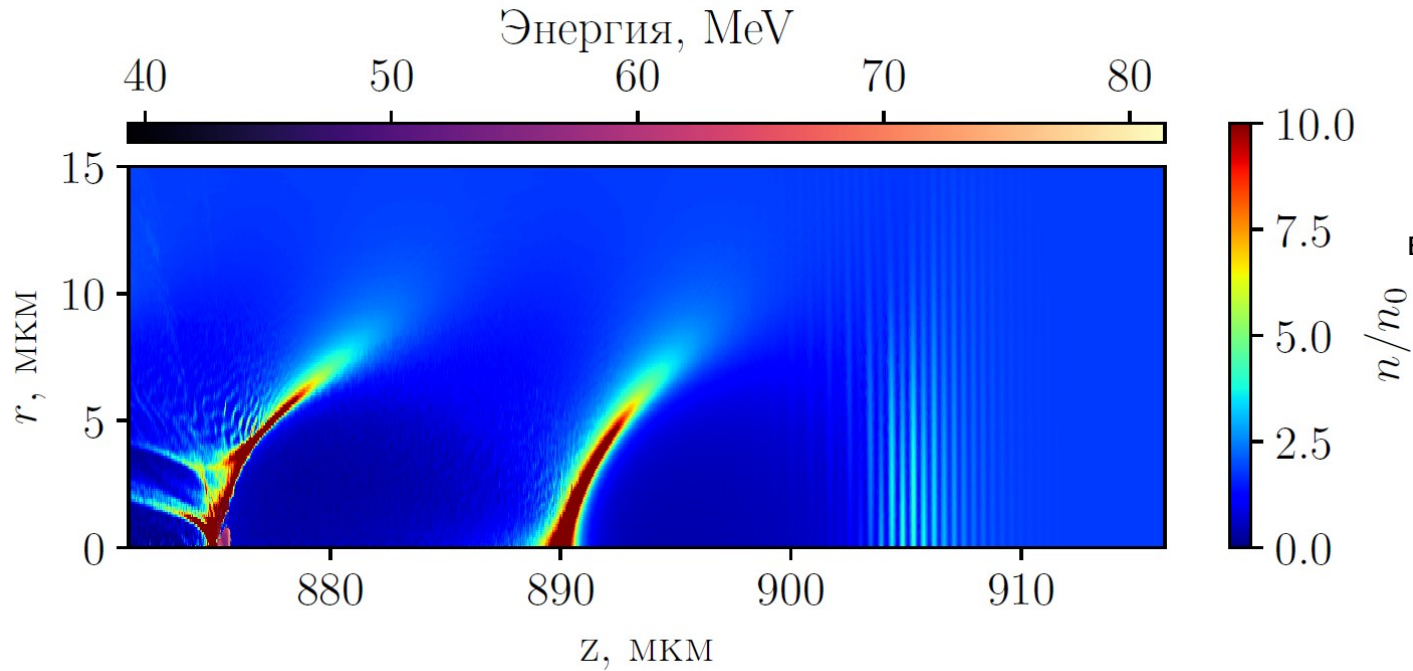


Сканирование точки фокусировки

Распределение интенсивности лазерного излучения



Полное моделирование



Фокусировка лазерного импульса
вглубь плазмы позволяет инициировать
захват электронов плазмы

Моделирование в квазистатическом
приближении позволяет
производить быстрое сканирование
параметров взаимодействия

Эти результаты качественно
согласуются с вычислениями
без использования приближений

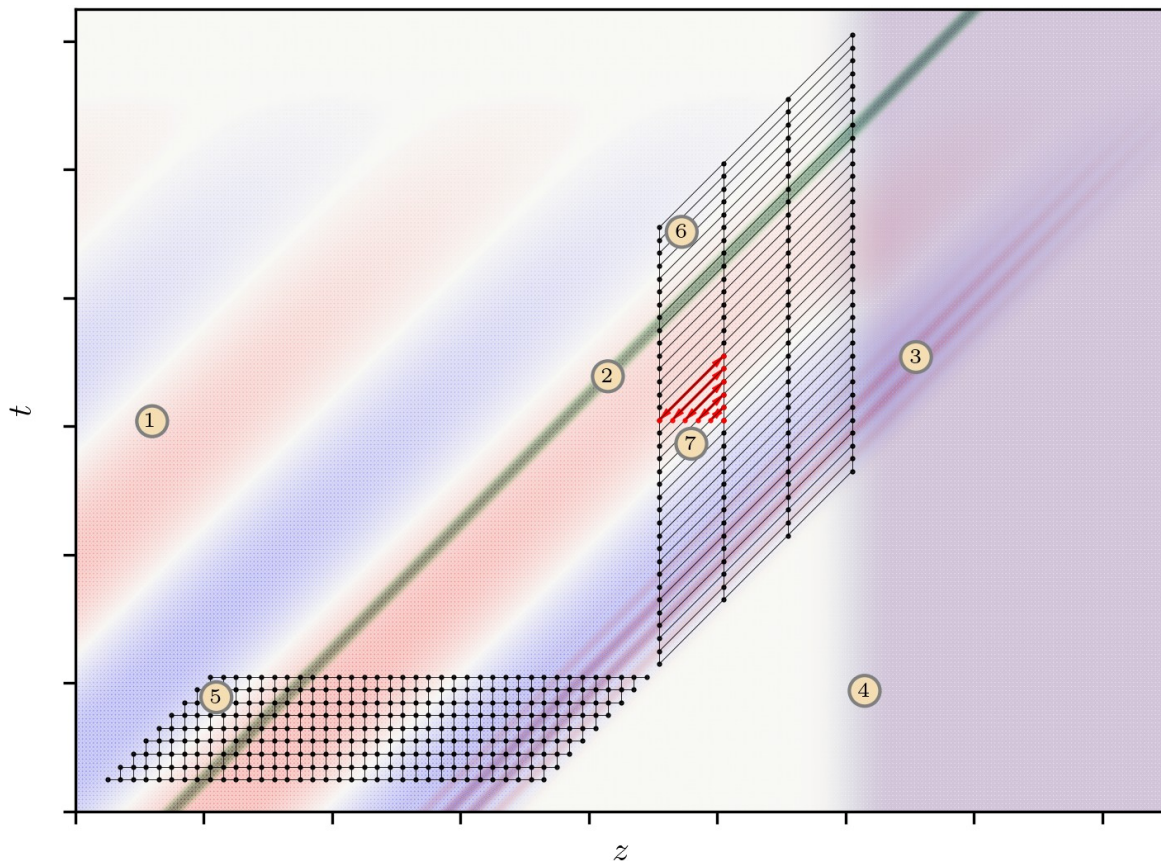
	Энергия	Энергоразброс	эммитанс	заряд	Время вычислений
FBPIC	77 МэВ	16 МэВ	8 мм мрад	18	115 часов
LCODE	75 МэВ	30 МэВ	4 мм мрад	120	30 минут

P.V. Tuev and K.V. Lotov // Optimization of moderate-
power laser pulse interaction with plasmas using
quasistatic simulations // 47th EPS Conference on
Plasma Physics Europhysics Conference Abstracts. –
2021. – Vol. 45A– p. P2.2004.

План выступления

- Введение
- Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи
- Вторая глава: модификация квазистатического приближения
- Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия
- **Четвертая глава: новая модель описания плазмы**
- Пятая глава: каналирование лазерного излучения
- Заключение

Идея улучшения квазистатической модели плазмы



- 1 – плазменная волна
- 2 – витнесс
- 3 – драйвер
- 4 – градиент плотности
- 5 – сетка моделирования PIC
- 6 – сетка моделирования QSA
- 7 – двойственность ξ

$$\begin{array}{c}
 (z, t) \\
 \downarrow \\
 \begin{array}{l}
 s = z \\
 \xi = z - ct
 \end{array}
 \end{array}
 \quad
 \frac{\partial}{\partial s} \ll \frac{\partial}{\partial \xi}$$

(s, ξ)

Характеристики макрочастицы:

$$\chi = (x, y, \vec{p}, q)$$

В лабораторной системе отсчета:

$$\frac{d\chi}{dt} = F, \quad \chi = \chi(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\left(\vec{E} + \frac{1}{c}[\vec{v} \times \vec{B}]\right)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \qquad \frac{dq}{dt} = 0$$

Движение частиц

Характеристики макрочастицы:

$$\chi = (x, y, \vec{p}, q)$$

В лабораторной системе отсчета:

$$\frac{d\chi}{dt} = F, \quad \chi = \chi(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\left(\vec{E} + \frac{1}{c}[\vec{v} \times \vec{B}]\right)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \qquad \frac{dq}{dt} = 0$$

В квазистатических переменных:

$$\chi = \chi(x_0, y_0, z, t) = \chi(x_0, y_0, s, \xi)$$

Закон изменения:

$$\left. \frac{\partial \chi}{\partial \xi} \right|_{z_0} = ?$$

Движение частиц

Характеристика макрочастицы:

$$\chi = (x, y, \vec{p}, q)$$

В лабораторной системе отсчета:

$$\frac{d\chi}{dt} = F, \quad \chi = \chi(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \frac{1}{c}[\vec{v} \times \vec{B}])$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \quad \frac{dq}{dt} = 0$$

В квазистатистических переменных:

$$\chi = \chi(x_0, y_0, z, t) = \chi(x_0, y_0, s, \xi)$$

Закон изменения:

$$\frac{d\chi}{dt} = F = \frac{\partial \chi}{\partial s} \Big|_{\xi} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial \chi}{\partial \xi} \Big|_s \frac{d\xi}{dt}$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial s} \Big|_{\xi} v_z + \frac{\partial \chi}{\partial \xi} \Big|_s (v_z - c) = F$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial \xi} \Big|_s = \frac{1}{v_z - c} \left(F - v_z \frac{\partial \chi}{\partial s} \Big|_{\xi} \right)$$

Уравнения на поля

Из уравнений Максвелла:

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 4\pi \nabla \rho + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial \vec{j}}{\partial t}$$

$$\Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \left[\nabla \times \vec{j} \right]$$

Оставляем только слагаемые
первого порядка малости

Замена переменных:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial \xi}$$

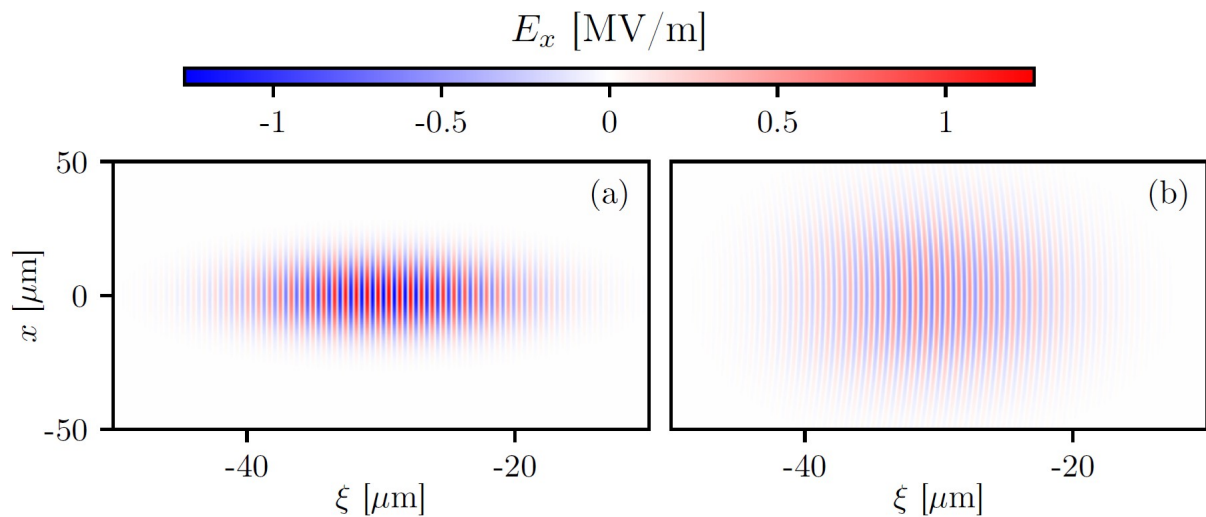
$$\frac{\partial}{\partial t} = -c \frac{\partial}{\partial \xi}$$

Уравнения на поля:

$$\left(\Delta_{\perp} + 2 \frac{\partial^2}{\partial s \partial \xi} \right) \vec{E} = 4\pi \hat{\nabla} \rho - \frac{4\pi}{c} \frac{\partial \vec{j}}{\partial \xi}$$

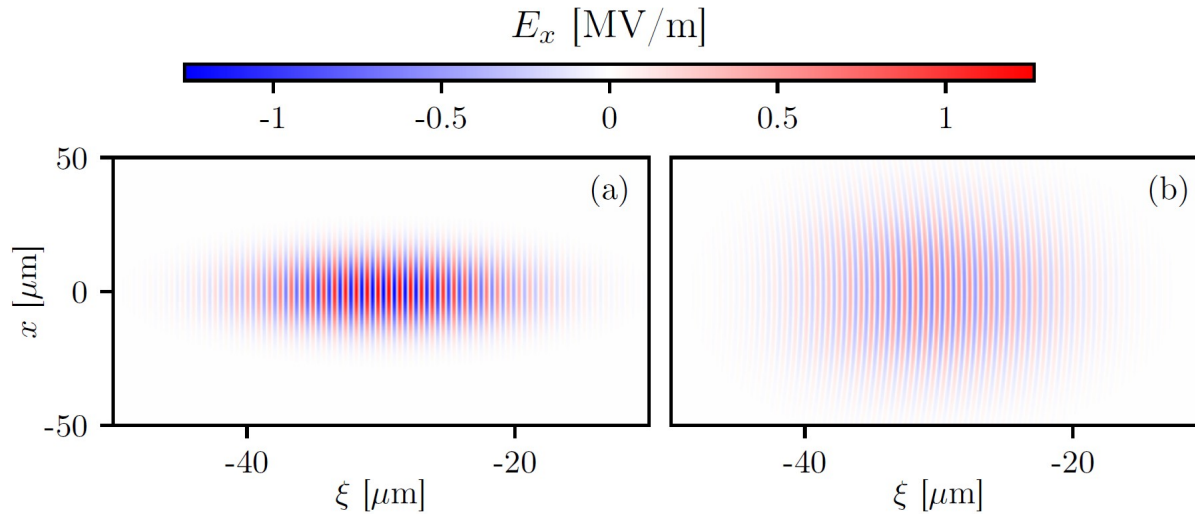
$$\left(\Delta_{\perp} + 2 \frac{\partial^2}{\partial s \partial \xi} \right) \vec{B} = -\frac{4\pi}{c} \left[\hat{\nabla} \times \vec{j} \right]$$

Распространение свободного излучения

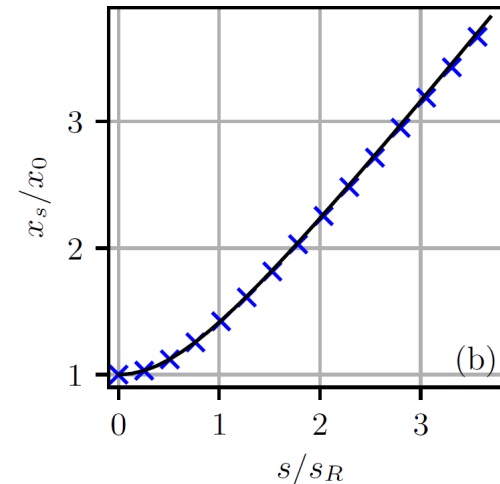
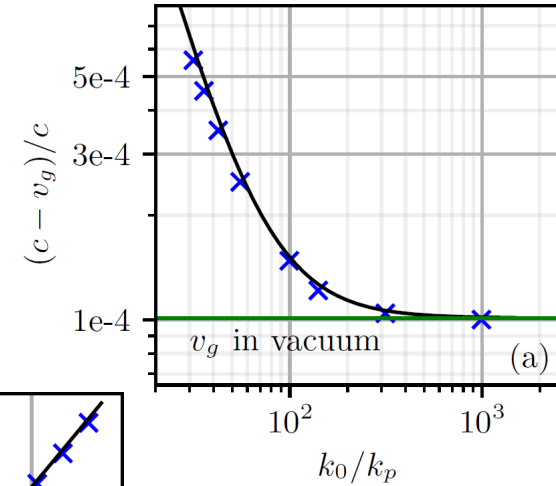


геометрия	плоская
λ	810 нм
(X_0, L_0)	(13, 9) мкм
окно моделирования	180x60 мкм
$\Delta\xi$	$\lambda / 40$
Δx	$\lambda / 4$
Δs	25λ

Распространение свободного излучения



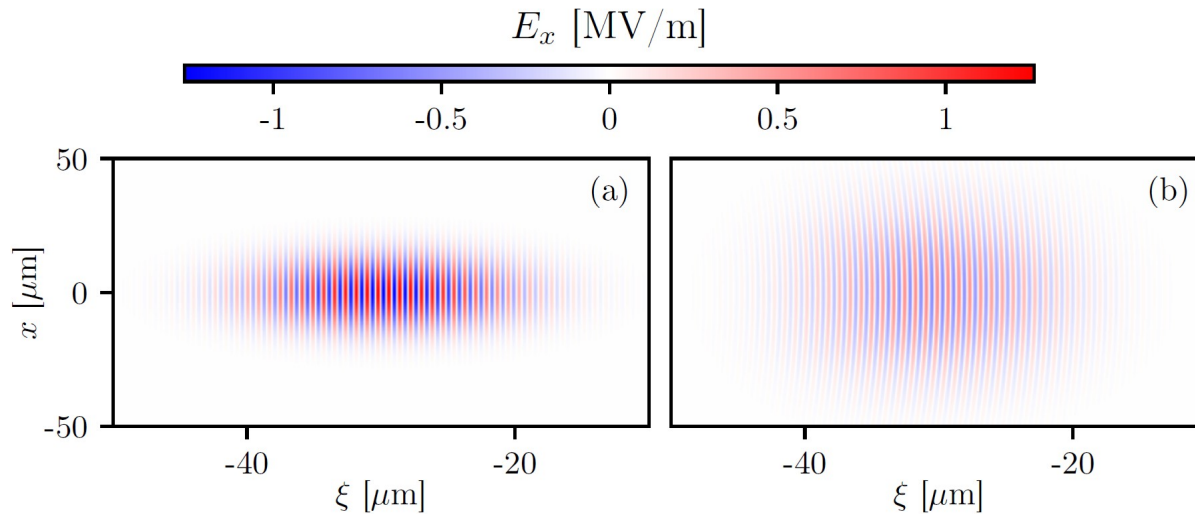
$$\frac{c - v_g}{c} = \frac{1}{x_0^2 k_0^2} + \frac{k_p^2}{2k_0^2}$$



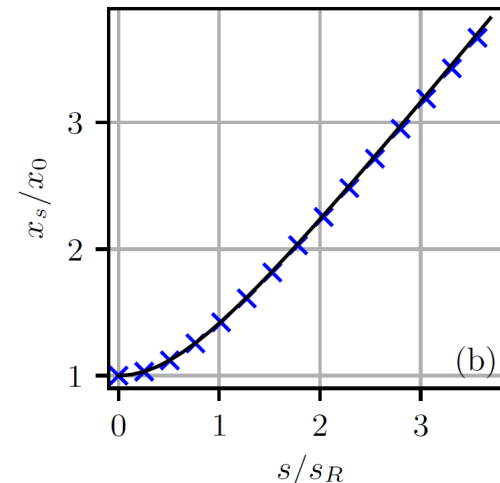
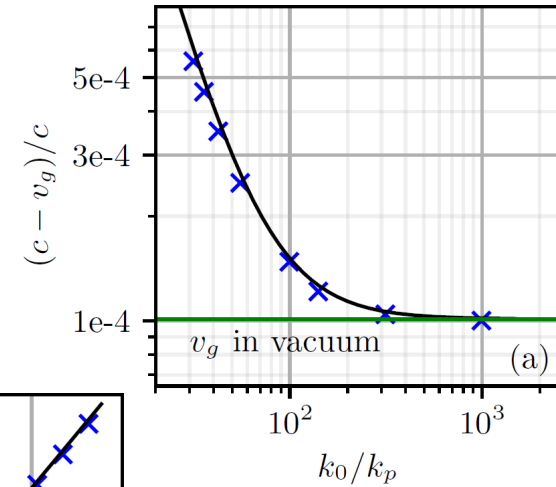
$$x_s = x_0 \sqrt{1 + \frac{s^2}{s_R^2}}$$

геометрия	плоская
λ	810 нм
(X_0, L_0)	(13, 9) мкм
окно моделирования	180x60 мкм
$\Delta\xi$	$\lambda / 40$
Δx	$\lambda / 4$
Δs	25λ

Распространение свободного излучения



$$\frac{c - v_g}{c} = \frac{1}{x_0^2 k_0^2} + \frac{k_p^2}{2k_0^2}$$



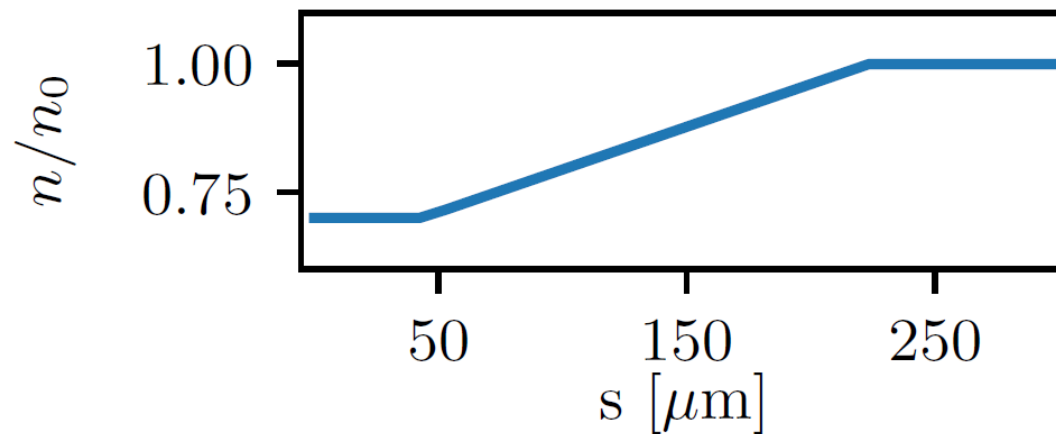
$$x_s = x_0 \sqrt{1 + \frac{s^2}{s_R^2}}$$

геометрия	плоская
λ	810 нм
(X_0, L_0)	(13, 9) мкм
окно моделирования	180x60 мкм
$\Delta\xi$	$\lambda / 40$
Δx	$\lambda / 4$
Δs	25 λ

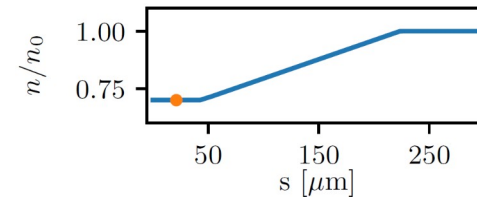
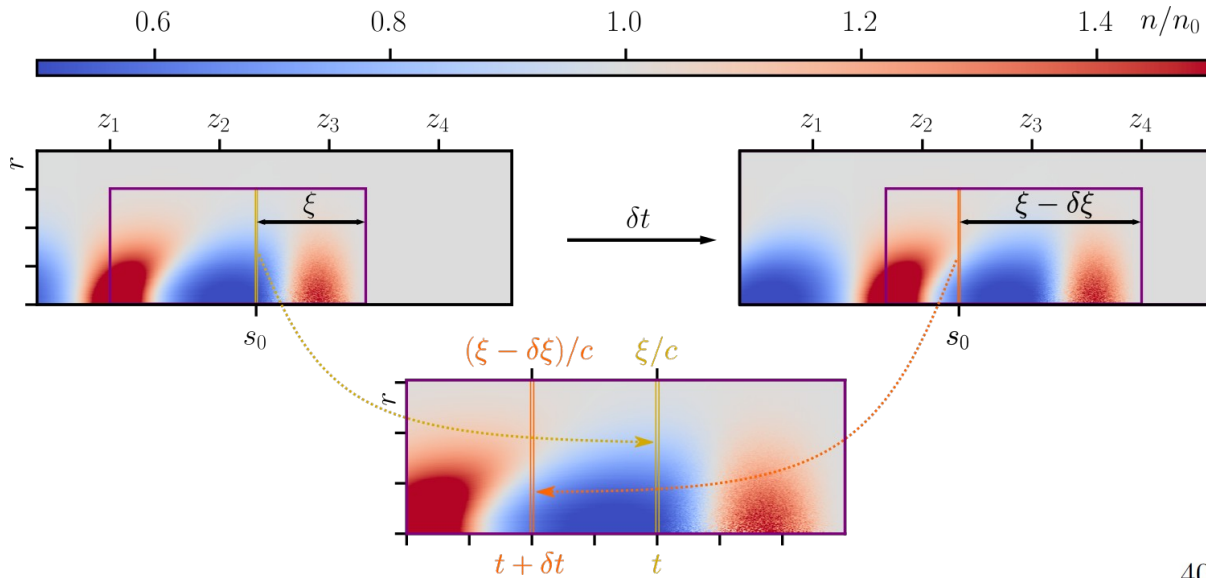
Точное описание распространения лазерного импульса при использовании большого шага глобальной эволюции состояния

Режим каверны в присутствии продольного градиента

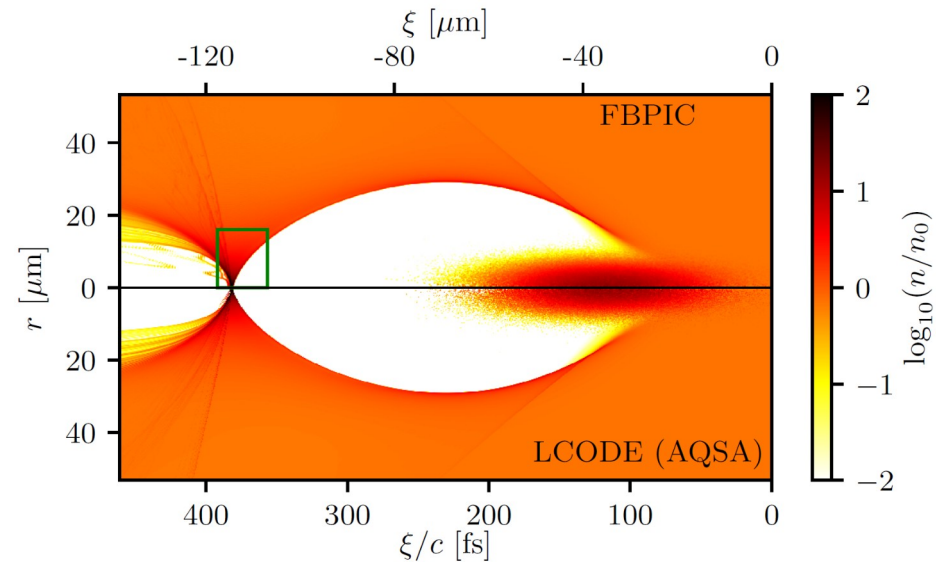
геометрия	цилиндрическая
частицы	электроны
ток	11 кА
γ	$4 \cdot 10^4$
n_0	$2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
(σ_r, σ_z)	(3, 10) мкм
окно моделирования	250x170 мкм
LCODE	
$\Delta \xi$	0.1 мкм
Δr	0.1 мкм
Δs	10 мкм
FBPIC	
Δz	0.1 мкм
Δr	0.1 мкм
$c\Delta t$	0.1 мкм

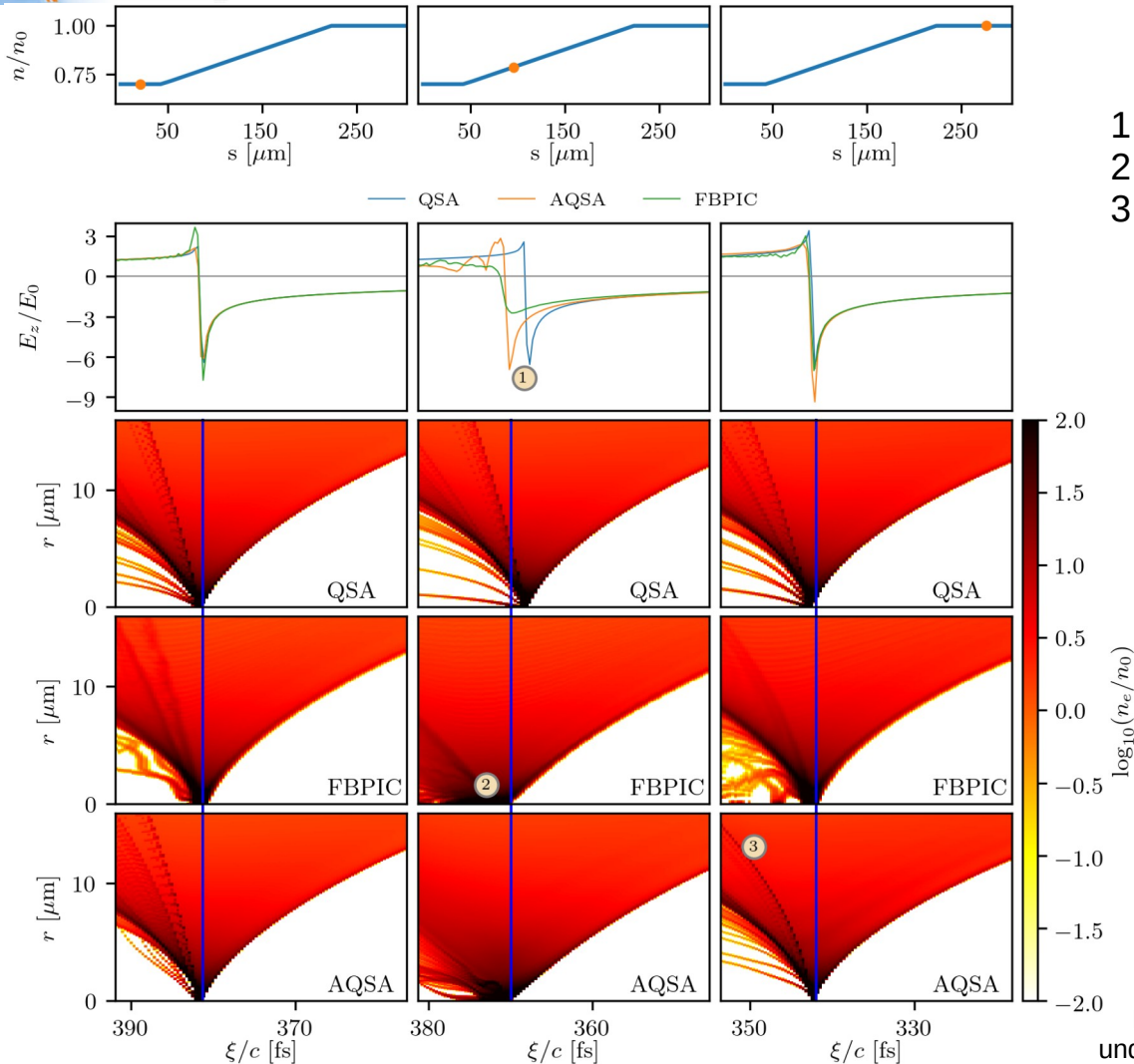


Преобразование координат



При пролете окна моделирования
отслеживается временная
эволюция состояния плазмы в
рассматриваемом сечении





Сравнение волны в разных точках

- 1 – удлинение периода волны
- 2 – уширение пика плотности
- 3 – ускоренные электроны с предыдущих слоев плазмы

В областях однородности плазмы все три модели имеют хорошее согласие.

При наличии градиента традиционное квазистатическое приближение не описывает уширение пика плотности и удлинения волны плазмы, вызванные приходом электронов из более ранних областей взаимодействия.

Моделирование с помощью AQSA потребовало в 80 раз меньше времени на тех же вычислительных ресурсах, что близко к теоретическому пределу отношения шагов эволюции, $\Delta s / c \Delta t = 100$

P.V. Tuev, R.I. Spitsyn and K. V. Lotov // Advanced quasistatic approximation // under review for Journal of Computational Physics (<https://arxiv.org/abs/2205.04390>)

План выступления

- Введение
- Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи
- Вторая глава: модификация квазистатического приближения
- Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия
- Четвертая глава: новая модель описания плазмы
- **Пятая глава: каналирование лазерного излучения**
- Заключение

Что дальше?

Лазерное кильватерное ускорение



Газовая струя



Капилляры

Что дальше?

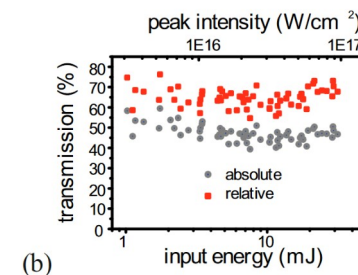
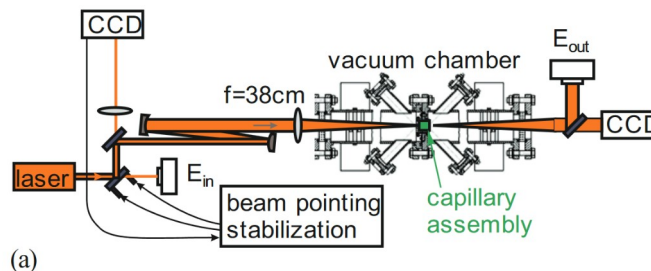
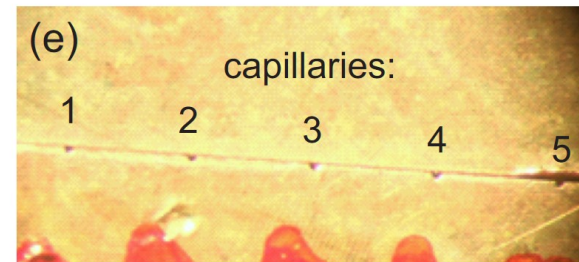
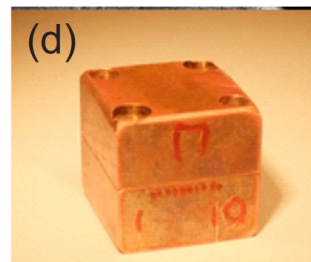
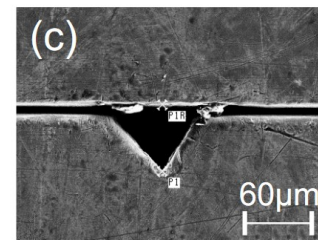
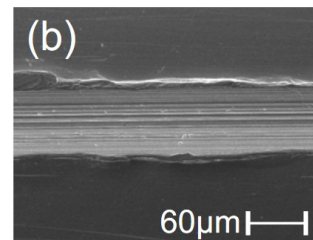
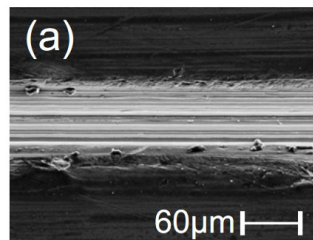
Лазерное кильватерное ускорение



Газовая струя



Капилляры



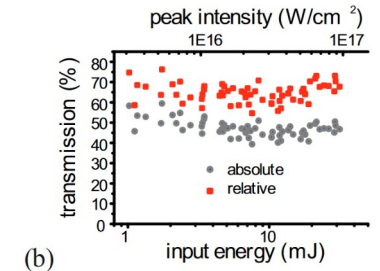
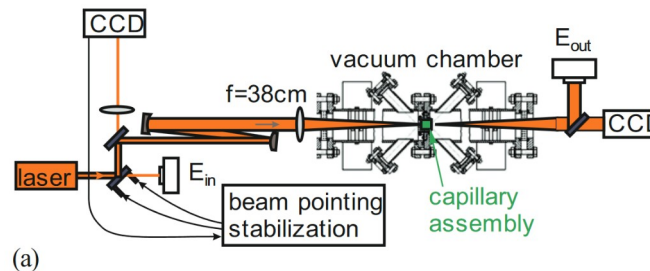
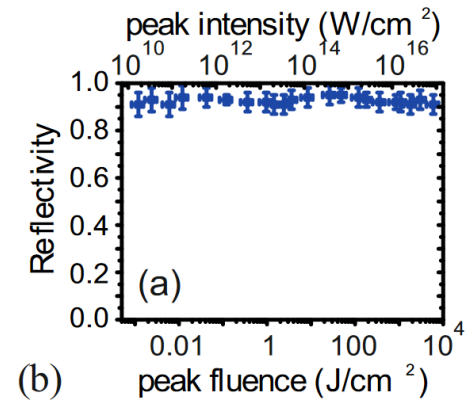
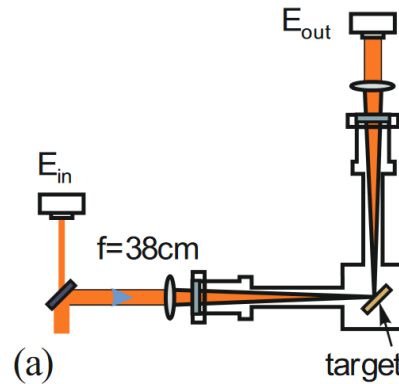
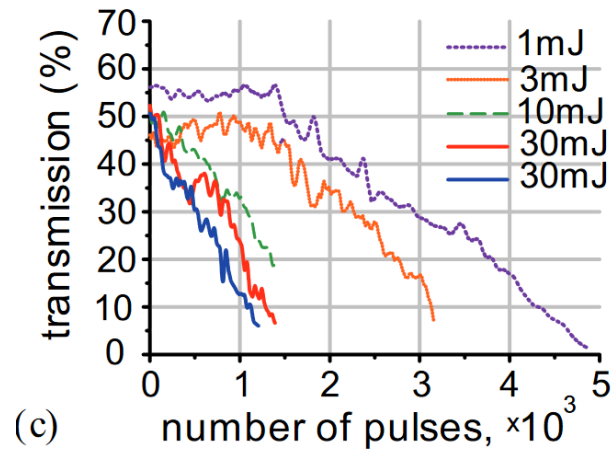
K.V. Lotov et.al., Physics of Plasmas 22, 103111 (2015)

Что дальше?

Лазерное кильватерное ускорение

↓
Газовая струя

↓
Капилляры



K.V. Lotov et.al., Physics of Plasmas 22, 103111 (2015)

Линейная теория

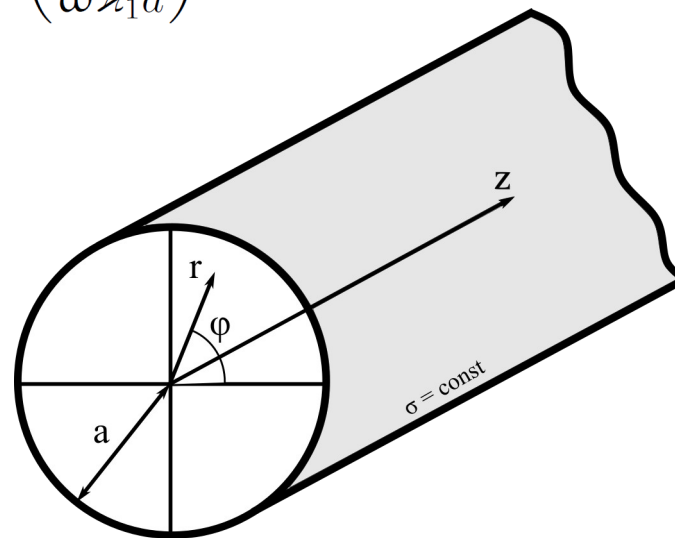
Полый цилиндрический волновод

Уравнения Максвелла + Граничные условия Леонтовича

$$E_z = -\zeta B_\varphi \quad E_\varphi = \zeta B_z \quad \zeta = 1/\sqrt{\epsilon_w}$$

$$\left(\frac{J'_m}{J_m} - \frac{i\kappa_1 c \zeta}{\omega} \right) \left(\frac{J'_m}{J_m} - \frac{i\kappa_1 c}{\omega \zeta} \right) = \left(\frac{mkc}{\omega \kappa_1 a} \right)^2$$

$$\delta \equiv \frac{\kappa_1 c}{|\zeta| \omega}$$



Линейная теория

Полый цилиндрический волновод

Уравнения Максвелла + Граничные условия Леонтовича

$$E_z = -\zeta B_\varphi \quad E_\varphi = \zeta B_z \quad \zeta = 1/\sqrt{\epsilon_w}$$

$$\left(\frac{J'_m}{J_m} - \frac{i\kappa_1 c \zeta}{\omega} \right) \left(\frac{J'_m}{J_m} - \frac{i\kappa_1 c}{\omega \zeta} \right) = \left(\frac{m k c}{\omega \kappa_1 a} \right)^2$$

$$\delta \equiv \frac{\kappa_1 c}{|\zeta| \omega}$$

$\delta \gg 1$

$\delta \ll 1$

TM_{m,n} и TE_{m,n}

TM_{m,n} → R_{m,n}

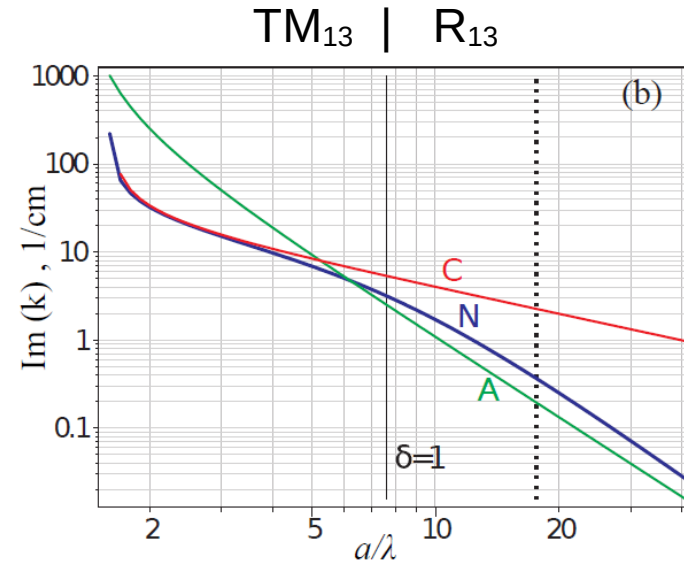
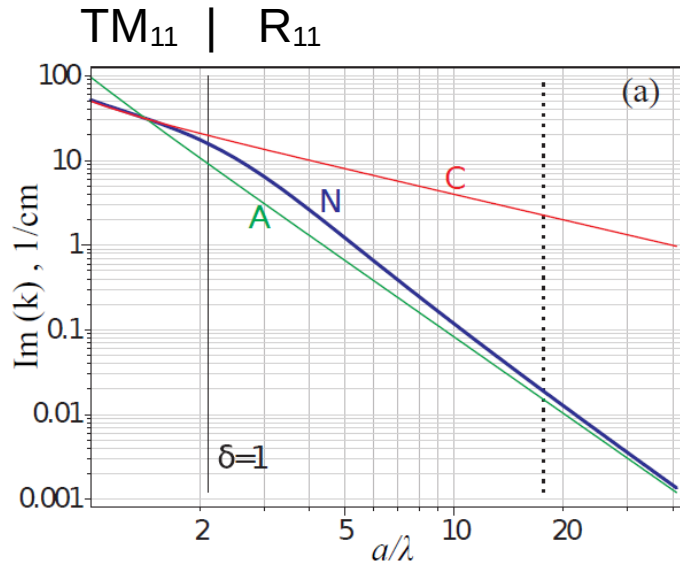
TE_{m,n-1} → L_{m,n}

R_{m,n} и L_{m,n}

I.A.Kotelnikov, Attenuation in Waveguide.
Technical Physics 49, 1196 (2004)

Затухание

Материал стенок	медь
Радиус, a	15 мкм
Длина волны лазера, λ	850 нм

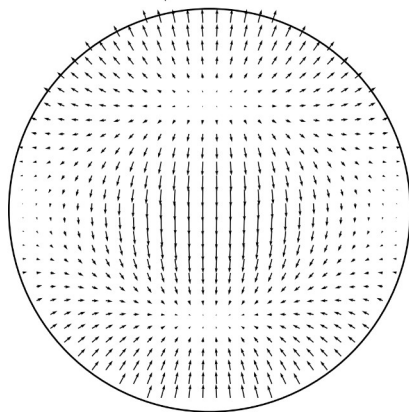


C – классический подход ($\delta \gg 1$)
A – приближенное решение ($\delta \ll 1$)
N – численное решение

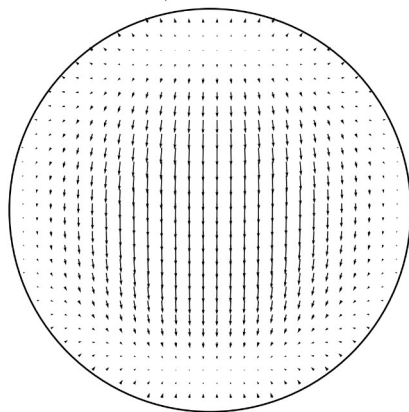
Распределение полей

$TM_{11} \rightarrow R_{11}$

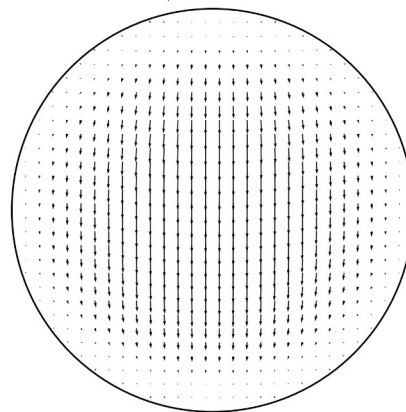
$a/\lambda = 1.0$



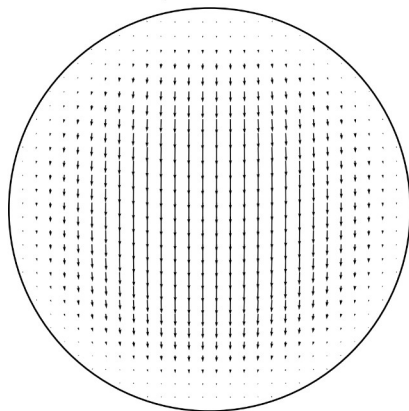
$a/\lambda = 2.8$



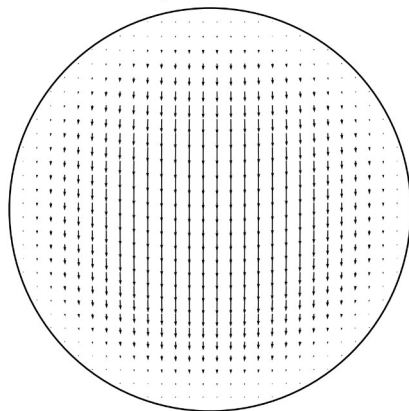
$a/\lambda = 4.6$



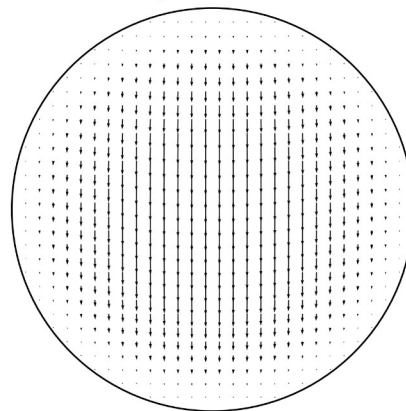
$a/\lambda = 6.4$



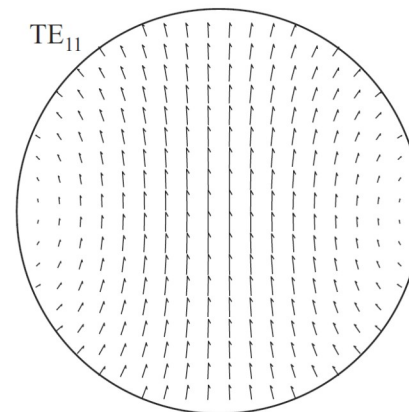
$a/\lambda = 8.2$



$a/\lambda = 10.0$

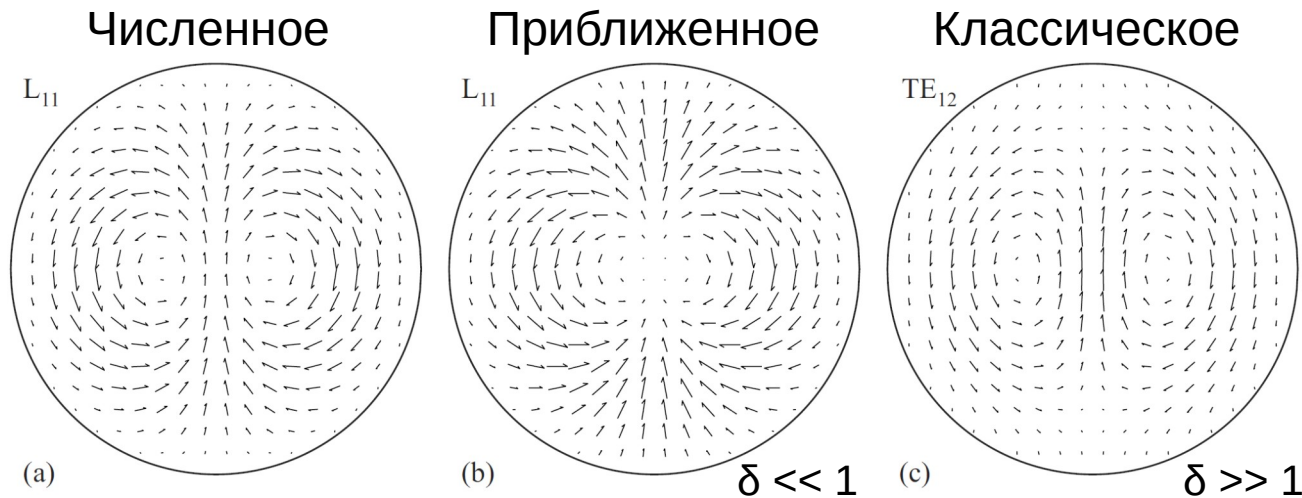


TE_{11}

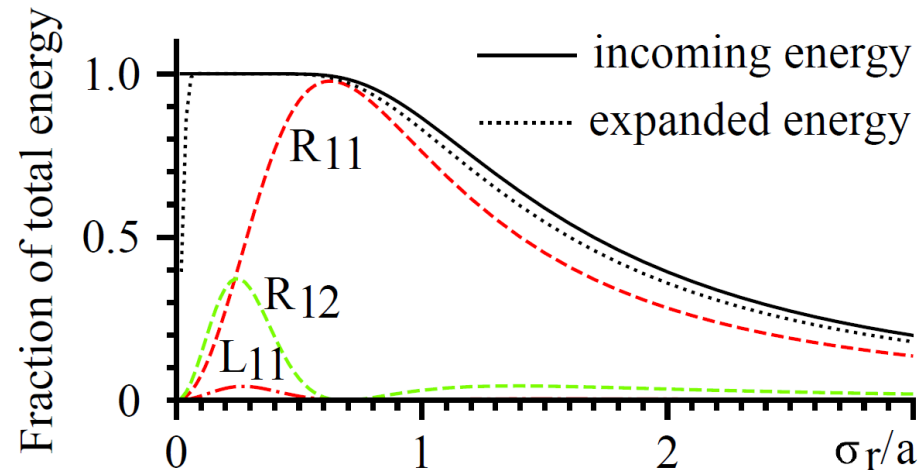


Нет поля на стенке
Меньше затухание

Разложение лазерного импульса по модам



Возбуждаются обе серии мод



P. V. Tuev and K. V. Lotov // Attenuation of waveguide modes in narrow metal capillaries // Journal of the Optical Society of America A vol. 38, No. 1, pp. 108-114 (2021).

План выступления

- Введение
- Первая глава: диагностика сверхзвуковой струи
- Вторая глава: модификация квазистатического приближения
- Третья глава: оптимизация параметров взаимодействия
- Четвертая глава: новая модель описания плазмы
- Пятая глава: каналирование лазерного излучения
- **Заключение**

Положения, выносимые на защиту

- 1) Интерференционные измерения с разложением полученного фазового распределения по монотонным функциям позволяют устойчиво измерять параметры сверхзвуковой газовой струи с набегом фазы в 1-2 рад.
- 2) При моделировании кильватерного ускорения в квазистатическом приближении возможно качественное описание процесса захвата плазменных электронов в волну. Это достигается путем перевода быстрых электронов из плазменной модели в пучковую на основе их текущей скорости и координаты. Такой подход позволяет производить быстрый анализ формирования пучка в лазерном кильватерном ускорении.
- 3) Смещение точки фокусировки вглубь плазмы позволяет инициировать захват электронов при взаимодействии лазерных импульсов с энергосодержанием около 300 мДж с однородной плазмой с плотностью около $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.
- 4) Включение в квазистатическую модель для исследования кильватерного ускорения влияния соседних слоев плазмы позволяет корректно моделировать плазму с продольными градиентами плотности и волны с ненулевой групповой скоростью. При этом численная реализация модели сохраняет пониженные требования на вычислительные ресурсы.
- 5) Упрощающие предположения, традиционно используемые в линейной теории описания волноводов, обладают заметной неточностью при анализе распространения излучения с длиной волны порядка 850 нм по металлическим капиллярам радиуса порядка 15 мкм.

Результаты работы докладывались и обсуждались на конкурсе молодых учёных ИЯФ СО РАН в 2018, 2020 и 2021 годах, а также представлялись на международных конференциях:

- 1) 43-я конференция по физике плазмы (EPS, Бельгия, Лёвен, 2016)
- 2) 2-я Европейская конференция по современным методам ускорения (EAAC, Италия, о. Эльба, 2017)
- 3) Конференция по лазер-плазменному ускорению (LPAW, Хорватия, Сплит, 2019);
- 4) Азиатский форум по ускорителям и детекторам (AFAD, Россия, Новосибирск, 2021);
- 5) 47-я конференция по физике плазмы (EPS, Испания, Барселона, 2021).

Публикации по теме диссертации

- 1) П.В. Туев, А.П. Соседкин, К.В. Лотов // Формирование ускоряемого сгустка из электронов плазмы при моделировании кильватерного ускорения квазистатическим кодом // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 4. С. 14–19.
- 2) S.V. Avtaeva, K.V. Gubin, V.I. Trunov, and P.V. Tuev // Algorithm for supersonic gas jet density profile retrieval from interferometric measurement // Journal of the Optical Society of America A vol. 36, No. 5, pp. 910-917 (2019).
- 3) P.V. Tuev and K.V. Lotov // Attenuation of waveguide modes in narrow metal capillaries // Journal of the Optical Society of America A vol. 38, No. 1, pp. 108-114 (2021).
- 4) P.V. Tuev, R.I. Spitsyn and K. V. Lotov // Advanced quasistatic approximation // under review for Journal of Computational Physics (<https://arxiv.org/abs/2205.04390>)
- 5) P. Tuev and K. Lotov // Mode structure of a short laser pulse propagating through a metal capillary // 43rd EPS Conference on Plasma Physics Europhysics Conference Abstracts. – 2016. – Vol. 40A – p. P5.088.
- 6) P.V. Tuev and K.V. Lotov // Optimization of moderate-power laser pulse interaction with plasmas using quasistatic simulations // 47th EPS Conference on Plasma Physics Europhysics Conference Abstracts. – 2021. – Vol. 45A– p. P2.2004.