



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

Кильватерное ускорение электронов из стеклянного капилляра

К.С. Назаров, И.В. Глазырин, О.Г. Котова, Н.А. Михайлов

Российский Федеральный ядерный Центр – ВНИИ Технической Физики
им. академ. Е.И. Забабахина

План презентации



Мотивация

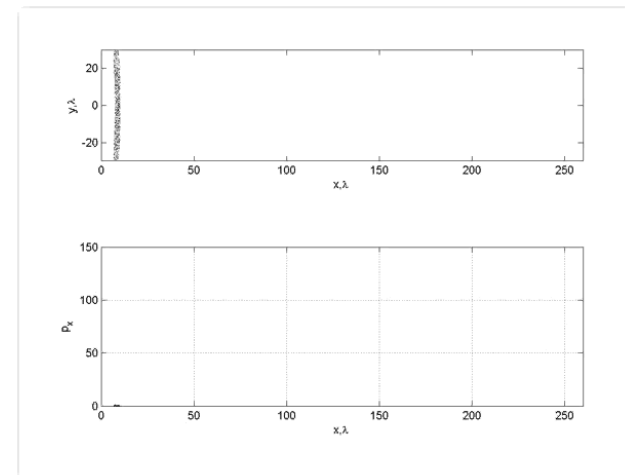
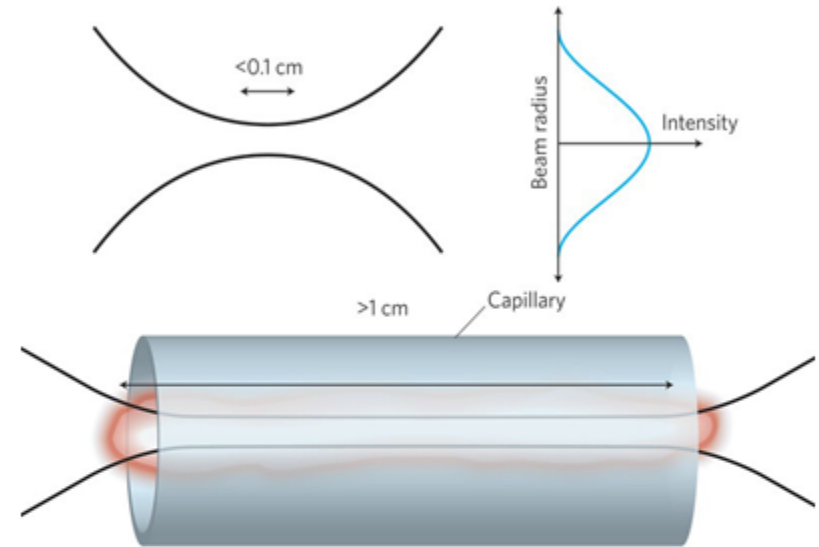
- I. Задача разлета вещества со стенок капилляра (ГД)
- II. Ускорение частиц в капилляре (PIC)

Заключение

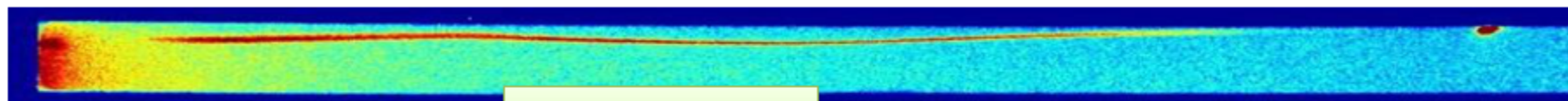
Мотивация

- Использование мощных коротких лазерных импульсов ($I > 10^{17} \text{ Вт/см}^2$) позволяет достичь кильватерного режима ускорения.
- Для этого ЛИ должен быть узкофокусирован на плазменной мишени.
- Однако, в этом случае высокая интенсивность импульса может сохраняться лишь на небольшом расстоянии, определяемом длиной Релея.
- Например, для гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 0.8 \text{ мкм}$ и диаметром фокуса $d = 10 \text{ мкм}$ соответствующая длина Релея будет равна

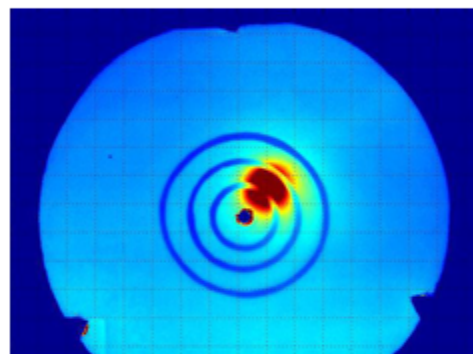
$$z_R = \frac{\pi(d/2)^2}{\lambda} \approx 100 \text{ мкм}$$



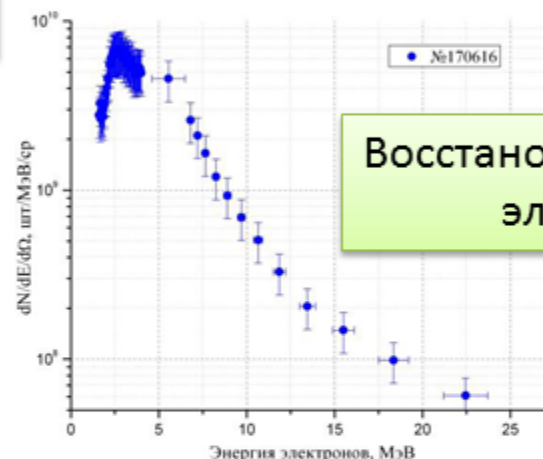
Эксперименты по ускорению: пучок и спектр



Спектрограмма



Монитор электронов



Восстановленный спектр электронов

- На **пикосекундной** лазерной установке проведена серия экспериментов по генерации релятивистских электронов из капиллярных мишеней. Ускорительная плазменная среда внутри капилляра формировалась за счет абляции его внутренних стенок под действием специально сформированного предимпульса.
- В экспериментах с капиллярами длиной 2 мм зарегистрированы пучки с колоколообразным угловым профилем (угол раствора на полувысоте ~ 50 мрад), экспоненциальным спектром с максимальной энергией ~ 20 МэВ, и зарядом в пучке ~ 200 пКл.

• Флегентов В.А., Сафронов К.В., Горохов С.А., Гаврилов Д.С., Лобода Е.А., Какшин А.Г., Пхайко Н.А.
«Экспериментальное исследование генерации пучков релятивистских электронов в стеклянных капиллярах под действием высокоинтенсивных лазерных импульсов», *Int. Conf. EPS (2018)*

Постановка задачи разлета вещества со стенок капилляра

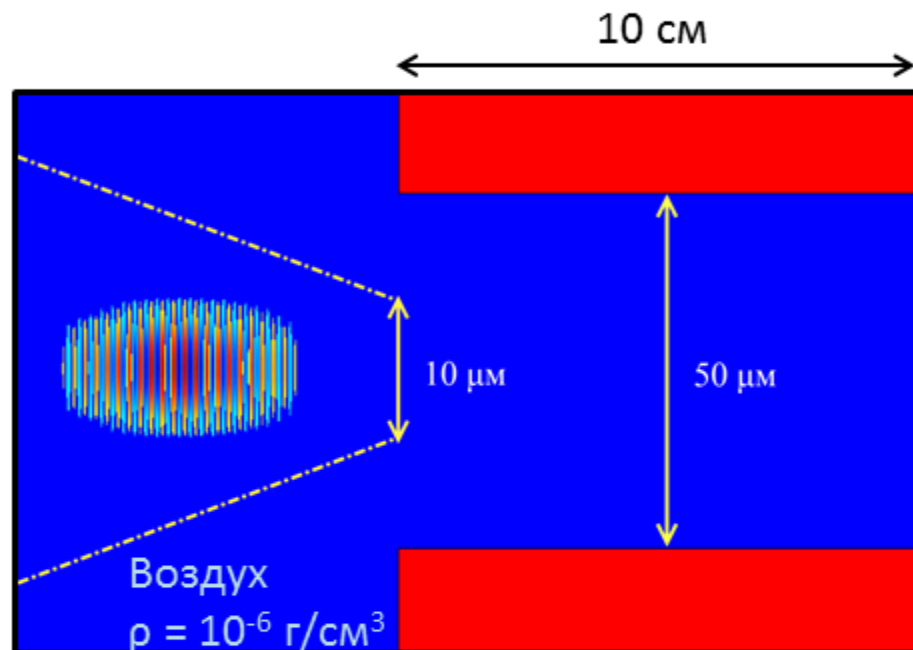


Параметры капилляра

- Стеклянный капилляр - SiO_2
- Плотность - $2,5 \text{ г/см}^3$
- Длина - 10 мм
- Внутренний диаметр - 50 мкм
- Толщина стенки - 50 мкм
- Начальная температура – 300 К

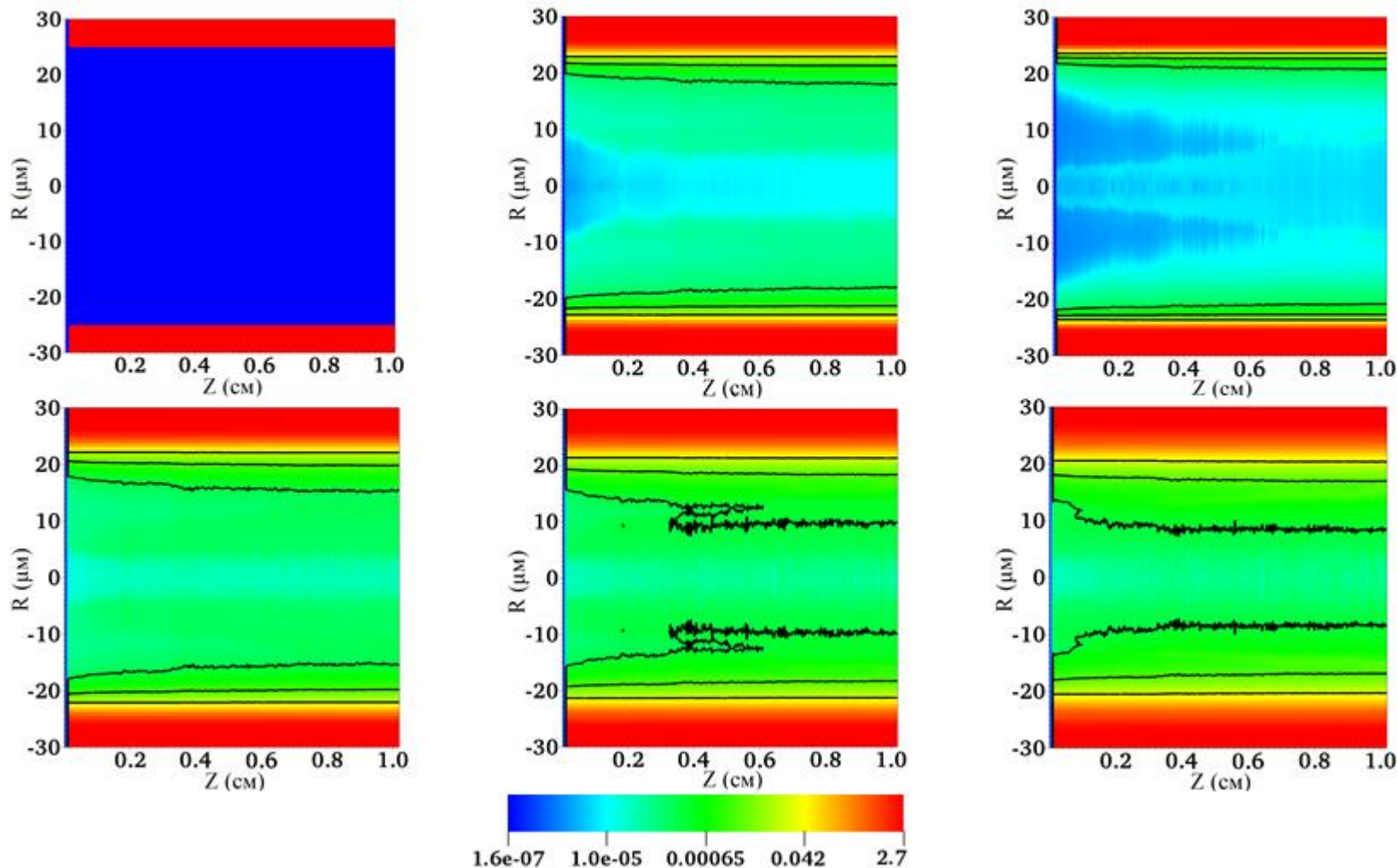
Параметры ЛИ

- Гауссова форма
- Длительность - 1 пс
- Длина волны - 1,053 мкм
- Диаметр (перед фокусирующим элементом) - $d = 10 \text{ мкм}$
- Фокусное расстояние:
 1. $F1 = 200 \text{ мм}$ ($E = 0.3; 1; 2 \text{ Дж}$)
 2. $F2 = 650 \text{ мм}$ ($E = 0.03; 0.1; 1 \text{ Дж}$)

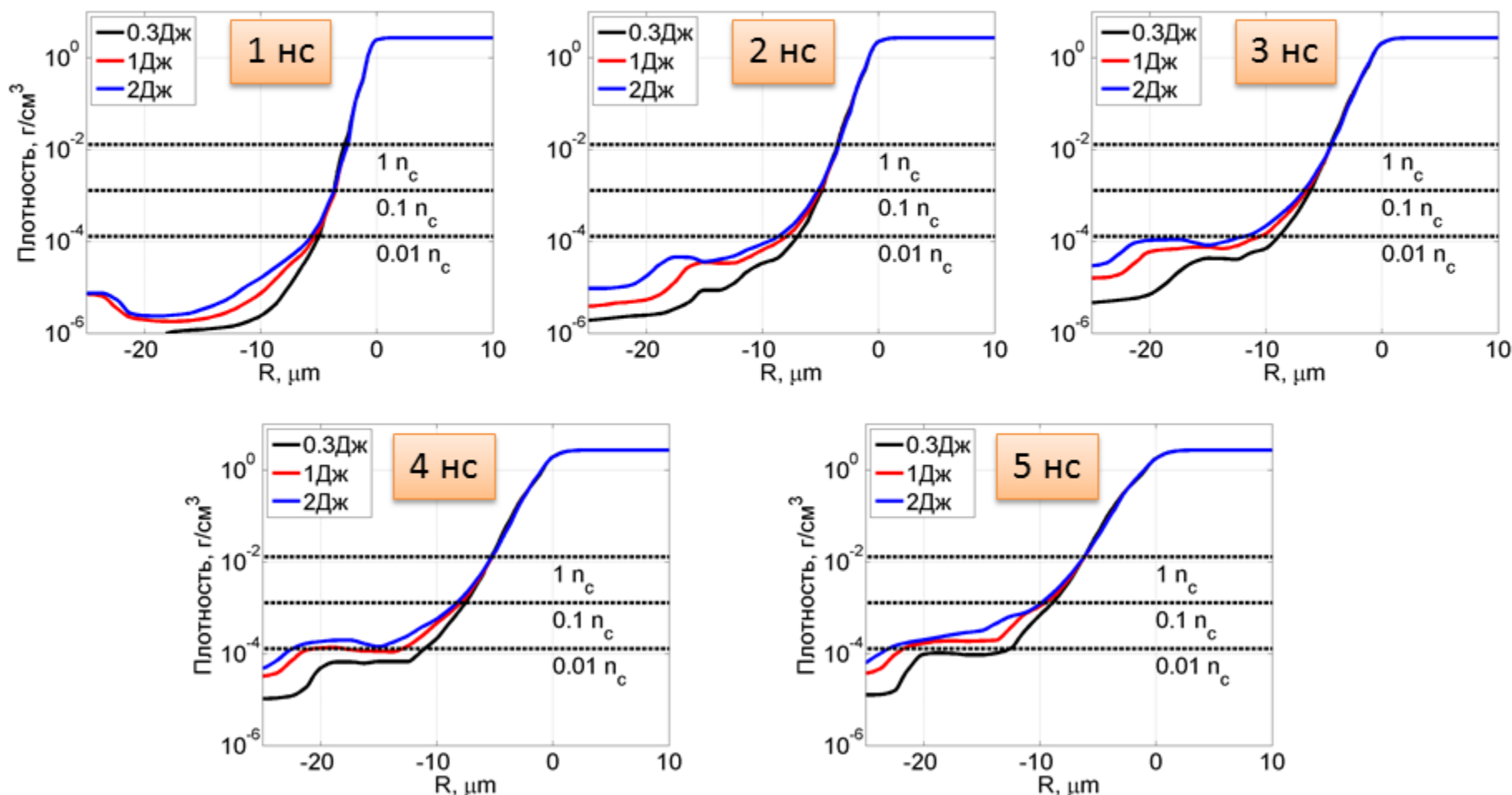


Схематическое изображение
постановки

Разлет вещества со стенок капилляра



Фокусное расстояние – 200мм



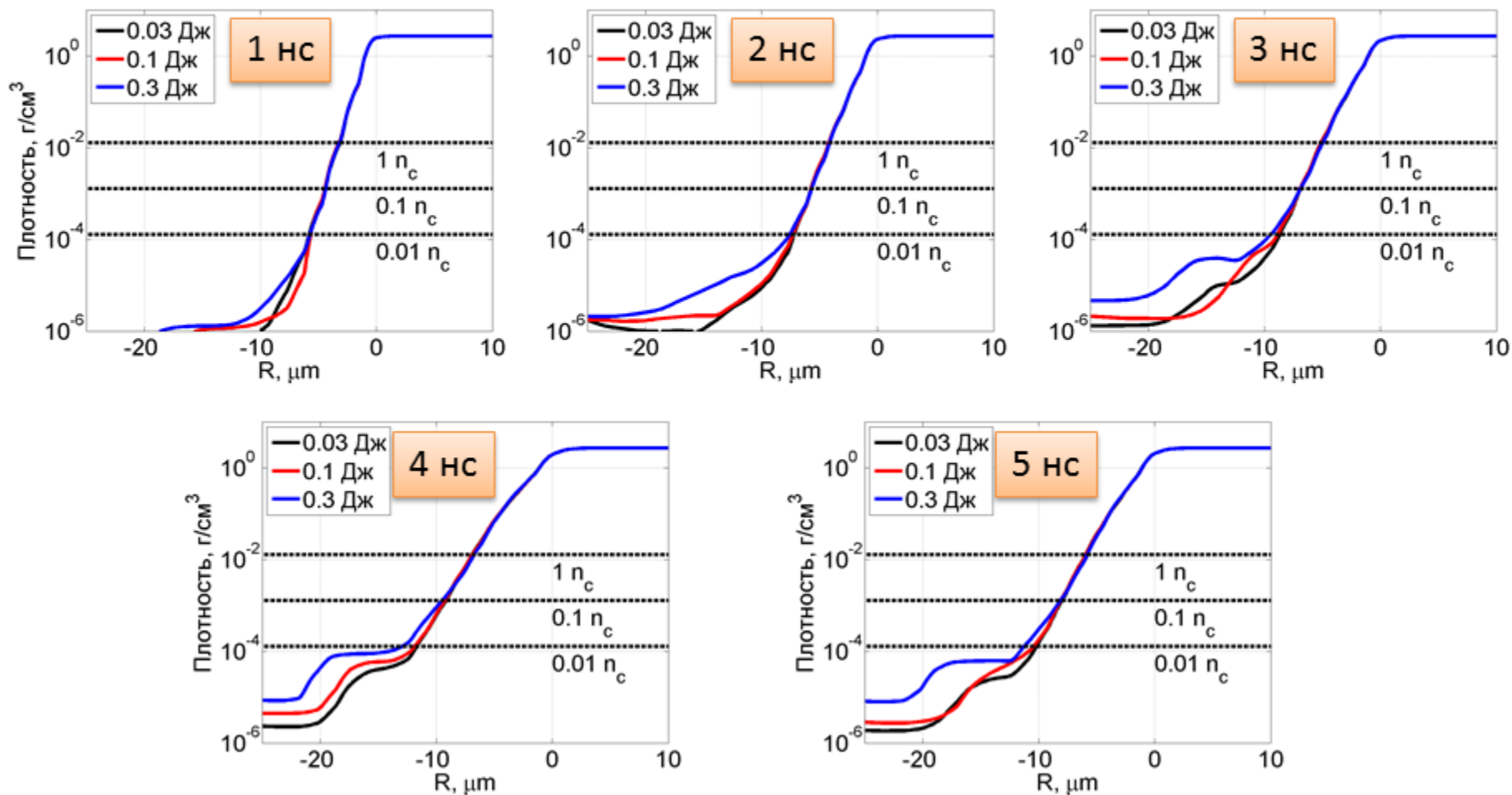
Скорость разлета плазмы

1.5 – 4.2 км/с ($0.01 n_c$)

0.8 – 2 км/с ($0.1 n_c$)

0.6 – 1 км/с (n_c)

Фокусное расстояние – 650мм

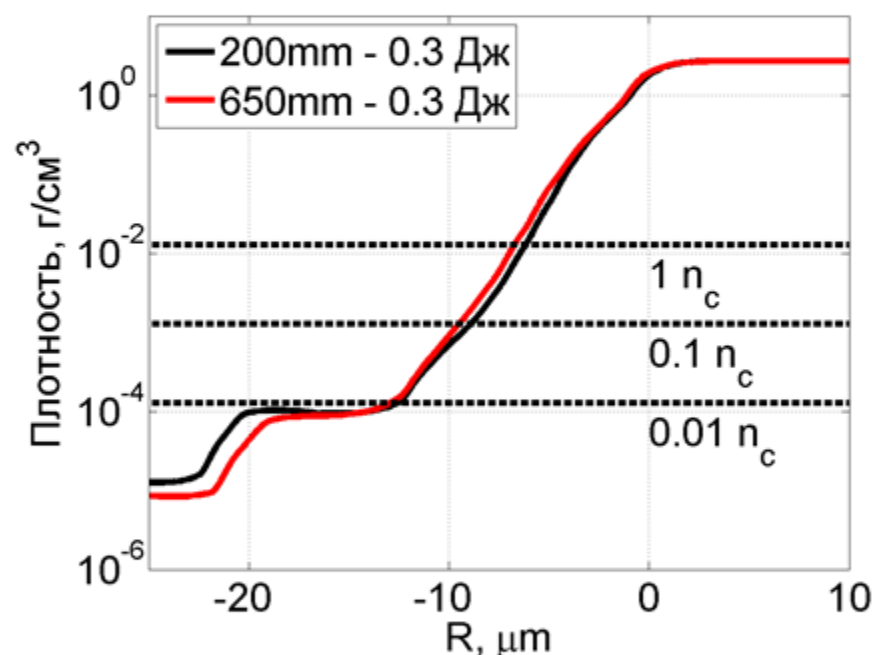


Сравнение расчетов с различным фокусным расстоянием



- Если сравнить профили плотности, полученные в расчете с одной и той же энергией 0.3 Дж для двух линз с разным фокусным расстоянием, то можно увидеть, что более короткофокусная линза чуть лучше "прогревает" капилляр, т.к. угол, под которым падает излучение у такой линзы больше.

- Вероятнее всего, увеличение доли поглощенной энергии происходит как за счет большего угла падения на облучаемую поверхность, так и за счет увеличения числа переотражений.



ELF - Система уравнений



Уравнения Власова

$$\frac{\partial f_g}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{p}) \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f_g + \mathbf{F}_g \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_g = 0,$$

$$\mathbf{p} = m_g \gamma \mathbf{v}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \mathbf{v}^2/c^2}} = \sqrt{1 + (\mathbf{p}/m_g c)^2},$$

$$\mathbf{F}_g = q_g \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \right).$$

Плотности заряда и тока

$$\varrho(t, \mathbf{x}) = \sum_g q_g \int f_g(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) d\mathbf{p},$$

$$\mathbf{J}(t, \mathbf{x}) = \sum_g q_g \int \mathbf{v}(\mathbf{p}) f_g(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) d\mathbf{p}.$$

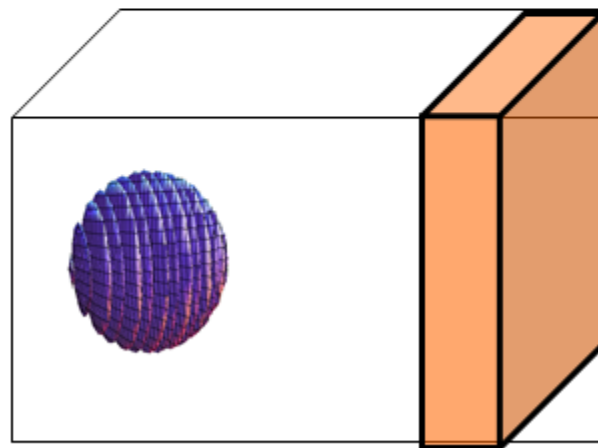
Уравнения Максвелла

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = c [\nabla \times \mathbf{B}] - 4\pi \mathbf{J},$$

$$(\nabla \cdot \mathbf{E}) = 4\pi \varrho,$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c [\nabla \times \mathbf{E}],$$

$$(\nabla \cdot \mathbf{B}) = 0.$$



ГУ для ПОЛЕЙ:

- периодические;
- проводящие;
- открытые;
- поглощения.

ГУ для ЧАСТИЦ:

- периодические;
- поглощения;
- отражения.

PIC-метод

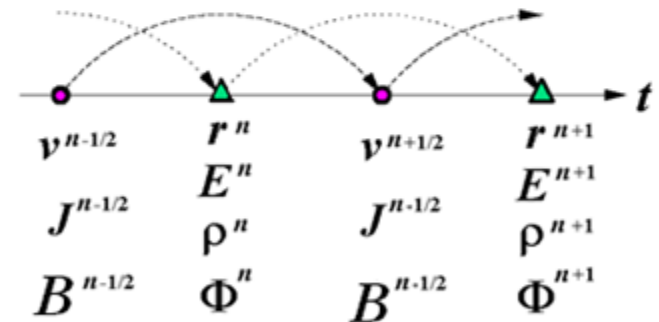
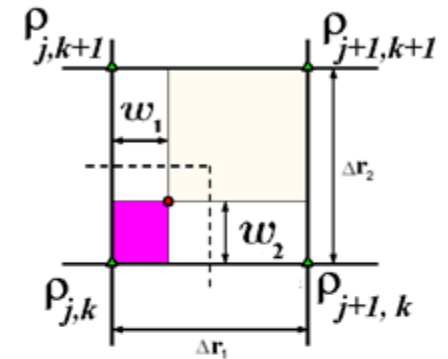
PIC-аппроксимация

$$f(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) = \sum_{\alpha=1}^{N_{\alpha}} q_{\alpha} R(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\alpha}) \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{\alpha})$$

«Метод с перешагиванием» (Leap-Frog) Схема Бориса

$$\frac{\mathbf{u}_{\alpha}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{u}_{\alpha}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{q_{\alpha}}{m_{\alpha}} \left(\mathbf{E}(\mathbf{x}_{\alpha}^n) + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_{\alpha}^n \times \mathbf{B}(\mathbf{x}_{\alpha}^n)] \right)$$

$$\frac{\mathbf{x}_{\alpha}^{n+1} - \mathbf{x}_{\alpha}^n}{\Delta t} = \mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}}$$



- Ю.Н. Григорьев, В.А. Вшивков и др. "Численное моделирование методами частиц-в-ячейках", (2004)
- J. Boris, "Relativistic plasma simulation - optimization of a hybrid code",
in *Proc. 4th Int. Conf. Num. Sim. of Plasmas*, (1970)

PIC-метод

Схема Yee для решения уравнений Максвелла

$$\frac{E^{n+1} - E^n}{\Delta t} = c \nabla^+ \times B^{n+\frac{1}{2}} - 4\pi J^{n+\frac{1}{2}}$$

$$\frac{B^{n+\frac{1}{2}} - B^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -c \nabla^- \times E^n$$

$$\nabla^+ \cdot E^n = 4\pi \rho^n$$

$$\nabla^- \cdot B^{n+\frac{1}{2}} = 0$$

Вычисление токов

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} + \nabla^+ \cdot J^{n+\frac{1}{2}} = 0$$

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} = \sum_{\alpha} \frac{q_{\alpha}}{\Delta t} [\bar{R}(x_{\alpha}^{n+1}) - \bar{R}(x_{\alpha}^n)]$$

Ячейка

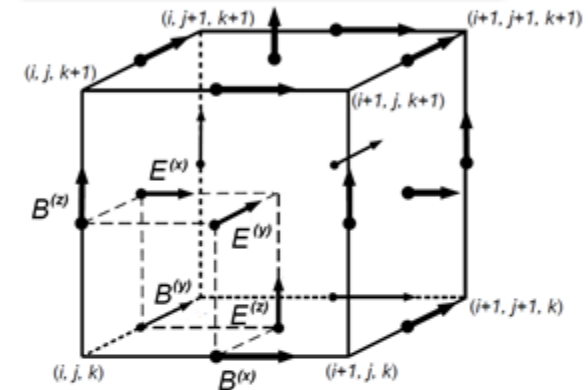
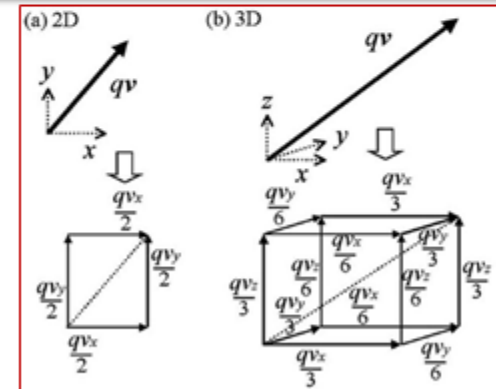


Схема Есиркепова [2]



- J. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas Prop.*, (1966)
- T. Esirkepov, "Exact charge conservation scheme for PIC simulation with an arbitrary form-factor", *Comp. Phys. Comm.* 135, 2001

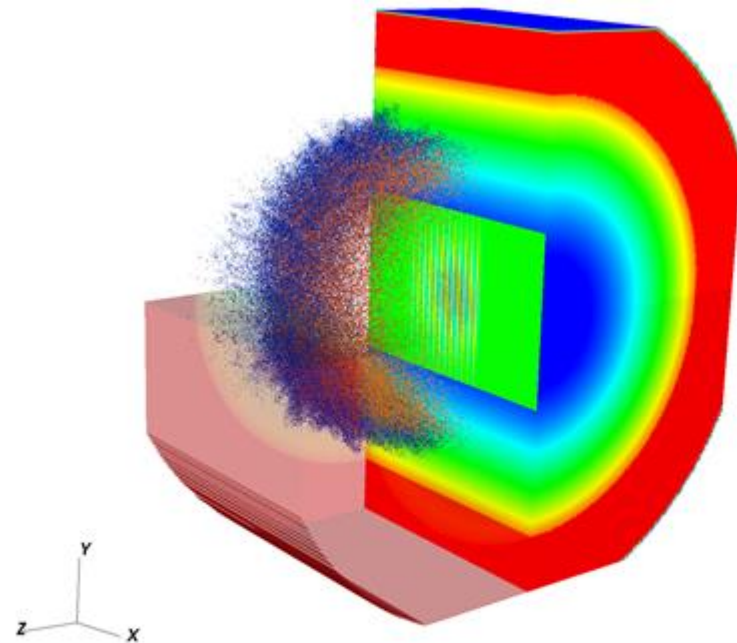
3D расчёт формирования пучка

Параметры ЛИ

- $a_0 \approx 7$
 - $\tau = 30$ фс
 - $r_f = 5$ мкм
 - $\lambda = 0.8$ мкм
 - Гауссово распределение
- $$z_R = \frac{\pi r^2}{\lambda} \approx 100 \text{ мкм}$$

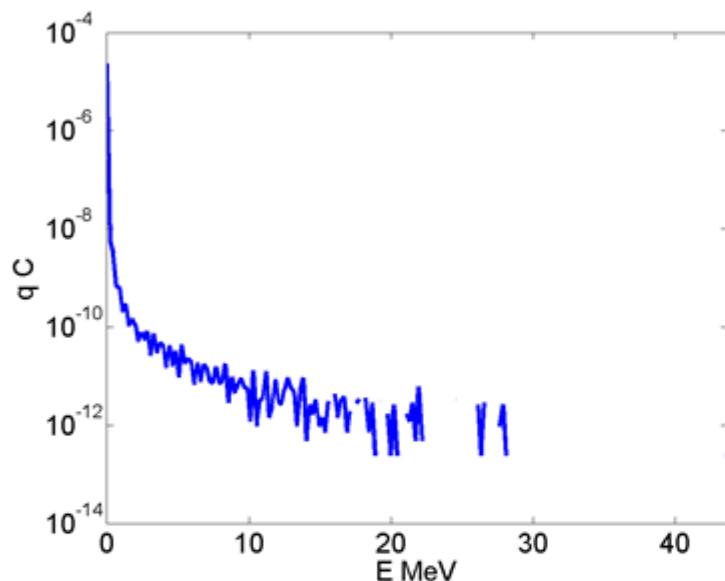
Параметры расчета

- Стекланный капилляр (SiO)
- Размеры области $80 \times 70 \times 70$ мкм
- $1200 \times 240 \times 240$ ячеек
- 5 частиц в ячейке



ЛИ в капилляре с плазмой, различным цветом показаны электроны с разных оболочек

Спектры электронных пучков: параболическое распределение



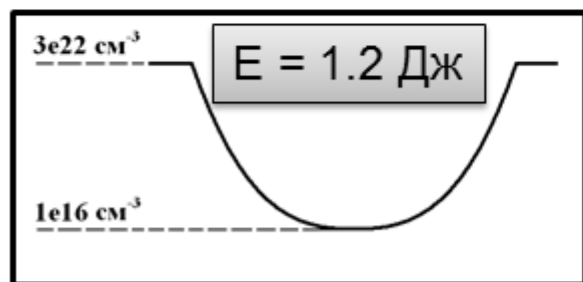
Характерный спектр
Время 1500 фс

$$\rho(r) = \rho_{axis} + A * r^2$$

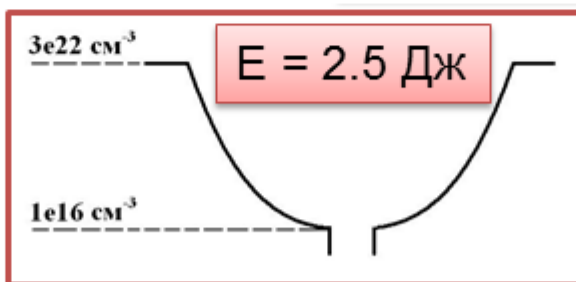
$$A = 2 * 10^{31}$$

$$\rho_{axis} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

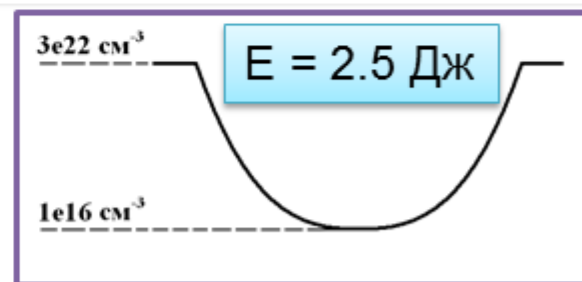
$$r_{cap} = 25 \text{ мкм}$$



$Q = 0.14 \text{ нКл}$
($E_{ele} > 3 \text{ MeV}$)



$Q = 0.86 \text{ нКл}$
($E_{ele} > 3 \text{ MeV}$)

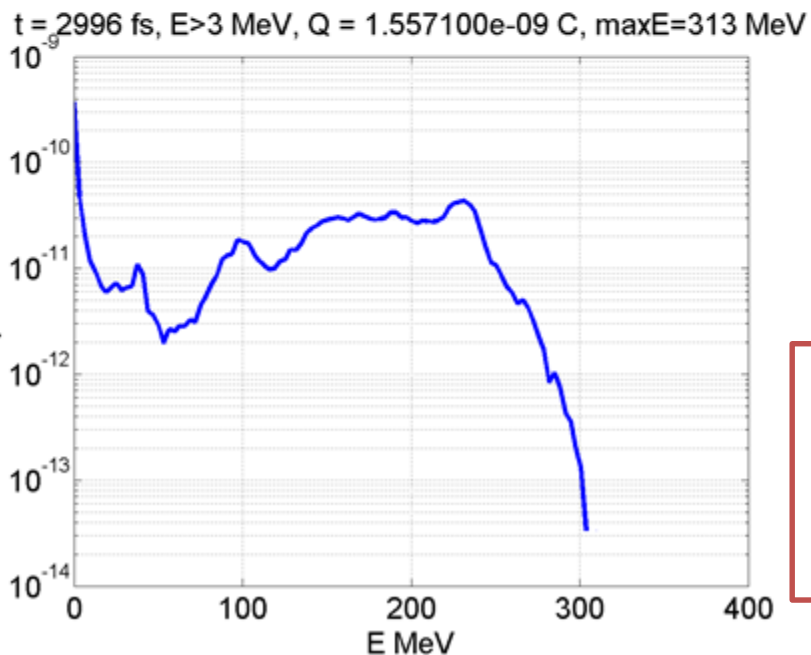
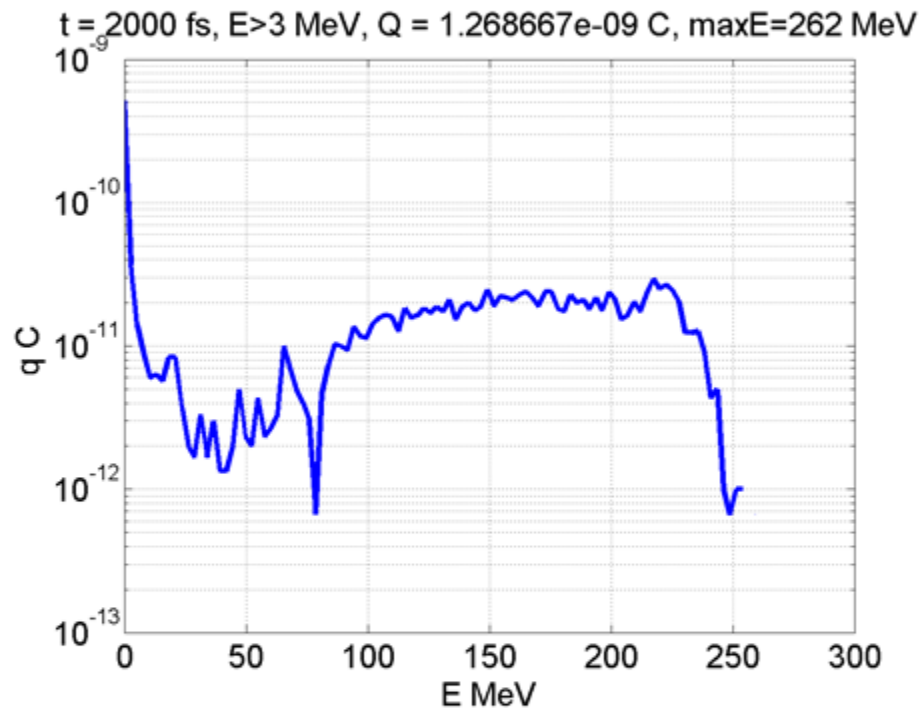


$Q = 0.64 \text{ нКл}$
($E_{ele} > 3 \text{ MeV}$)

Спектры электронных пучков: равномерное распределение

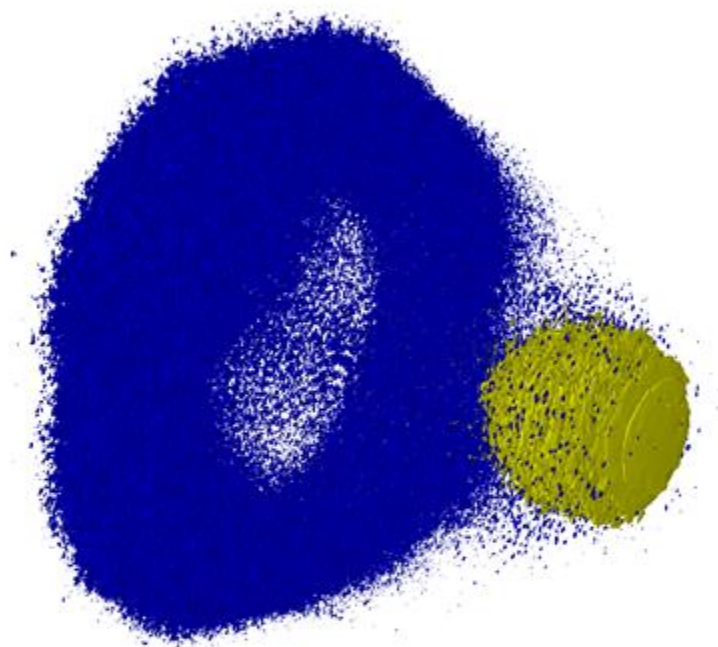


$r_{\text{cap}} = 20 \text{ мкм}$
 $Q = 1.25 \text{ нКл}$
 $E_{\text{ele}} > 3 \text{ МэВ}$
 $\theta = 3 \text{ мрад}$

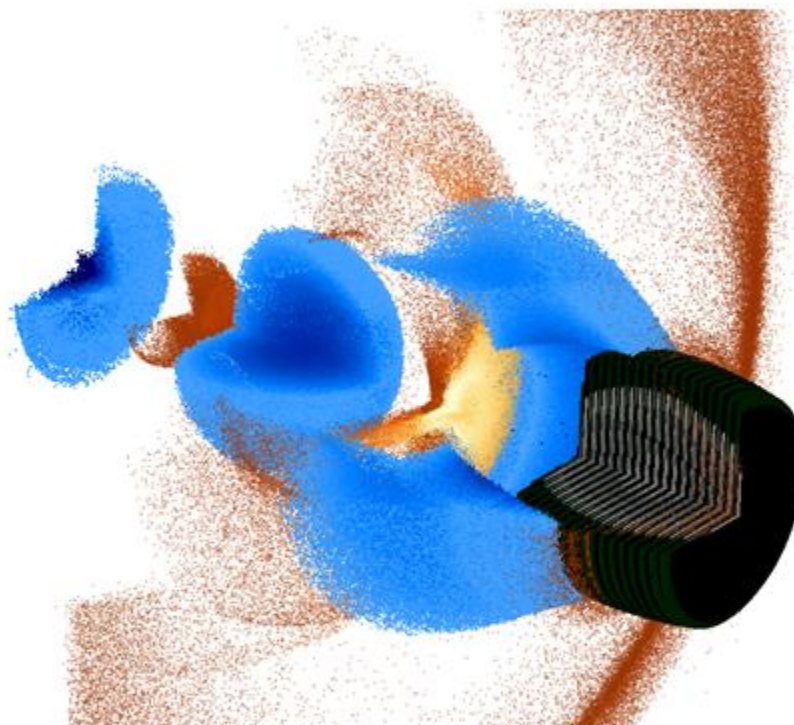


$r_{\text{cap}} = 30 \text{ мкм}$
 $Q = 1.5 \text{ нКл}$
 $E_{\text{ele}} > 3 \text{ МэВ}$
 $\theta = 3 \text{ мрад}$

Распределение ЛИ и электронов

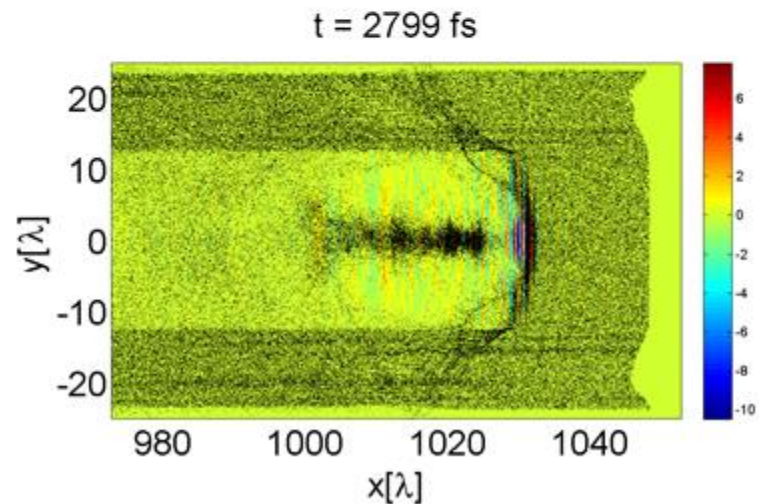
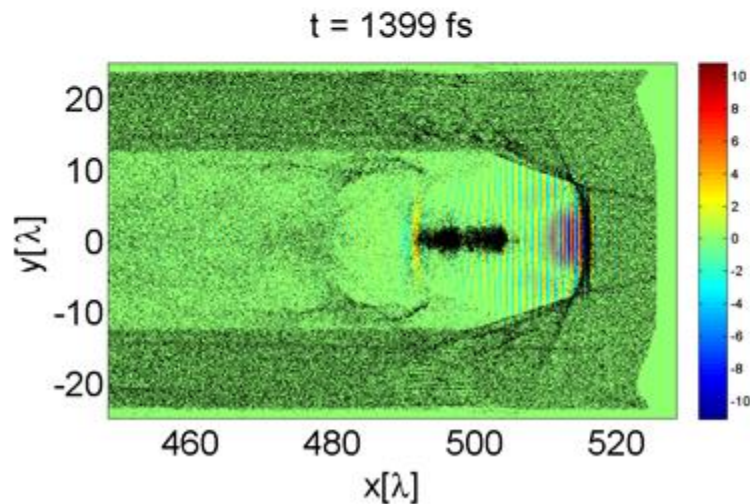
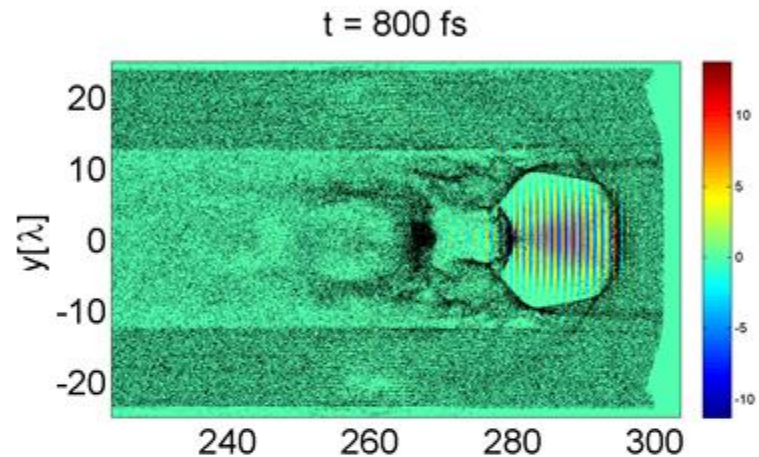
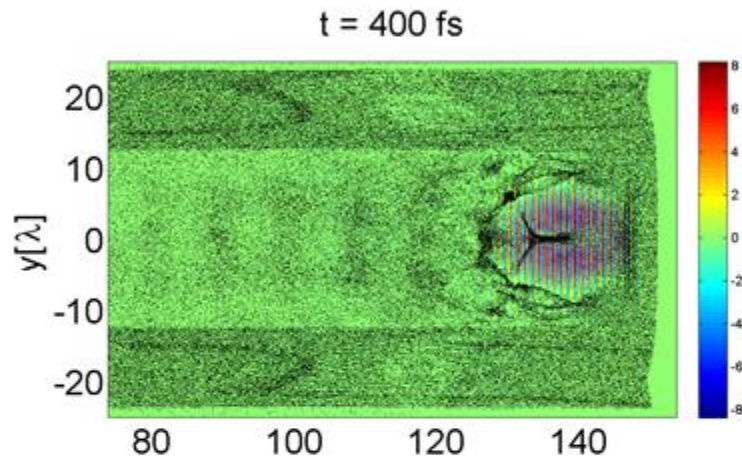


Параболическое распределение
плотности



Постоянное распределение
плотности

Формирование кильватерной волны в капилляре с постоянной плотностью



Импульс распространяется по среде практически без изменений на расстояние $> 10 z_R$

Заключение



- Проведено численное моделирование разлета плазмы в полном капилляре в результате воздействия разогревающего предымпульса. Посчитаны профили плотности и скорости разлета вещества для разных случаев фокусного расстояния. Достаточная энергия ЛИ для образования плазмы в капилляре равна 1-2 Дж.
- Исследованы возможности ускорения электронов из полого или газонаполненного капилляра с помощью коротких ультраинтенсивных ЛИ.
- Спектры и распределения частиц показывают, что более перспективным способом получения высокоэнергетичных частиц является использование газонаполненного капилляра с постоянной плотностью. Однако, заполнение капилляра такой однородной протяженной плазмы сопряжено с большими техническими трудностями.
- В тоже время, использование капилляра с параболическим распределением плотности позволяет получить электронные пучки с зарядом $\sim 0.5-1$ нКл и энергией 10-30 МэВ. При этом, варьируя профиль преплазмы и время появления основного ЛИ, можно генерировать электроны с требуемым зарядом и энергией.

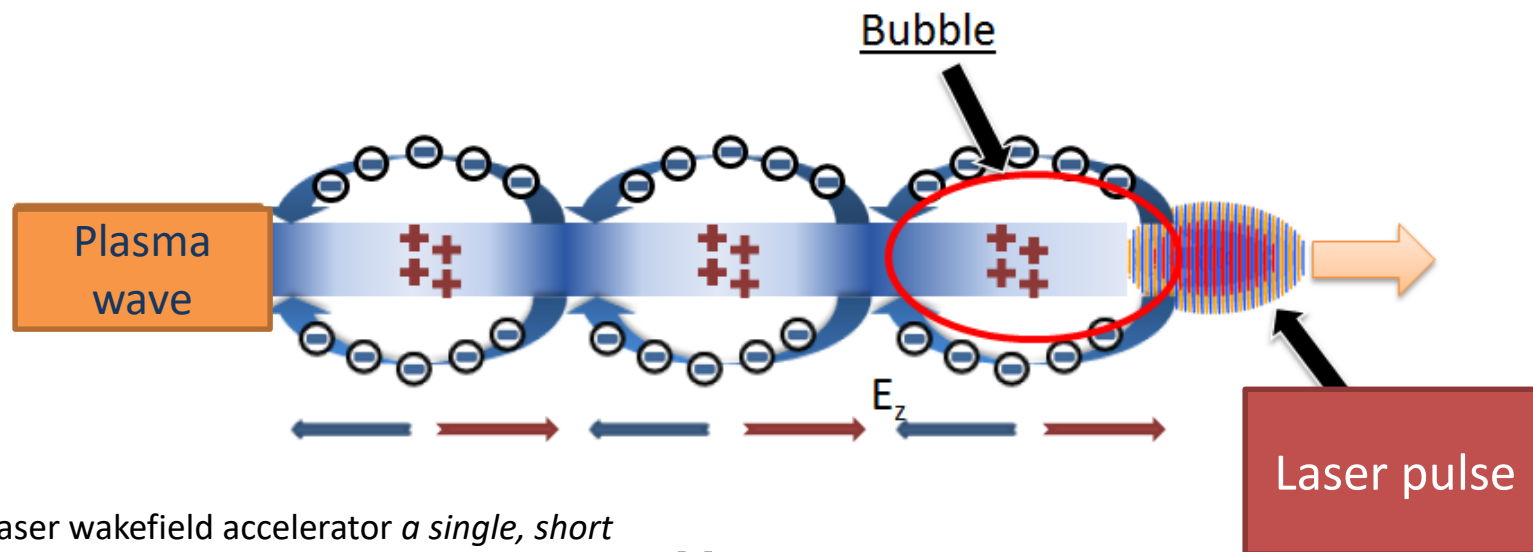
Проблемы и перспективы



- Определение влияния несоосности капилляра и ЛИ
- Разрушение капилляра и развитие неустойчивостей, в т.ч. из-за неоднородности облучения и последующей абляции
- Проблема синхронизации времени заполнения капилляра плазмой и появления основного ЛИ
- Поиск оптимального соотношения параметров капилляра и ЛИ

Спасибо за внимание!

Laser Wakefield Acceleration



- In the laser wakefield accelerator a *single, short 1 ps, high intensity* $>10^{17}$ W/cm² laser pulse drives a plasma wave.

- As an intense laser pulse propagates through an underdense plasma, the *ponderomotive force* associated with the laser pulse envelope, *expels* electrons from the region of the laser pulse.

- The *ponderomotive force* excites large *amplitude* plasma waves wakefields with phase velocities approximately equal to the laser pulse group velocity.

