

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ УКРОЧЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

О.Е. Вайс, М.Г. Лобок, В.Ю. Быченков

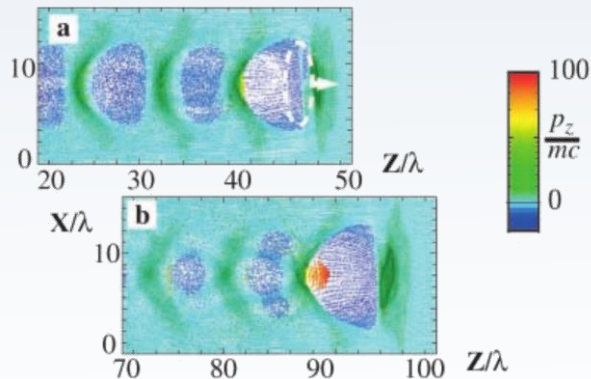
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

онлайн-семинар «Новые методы ускорения частиц и экстремальные состояния материи»

Лазерно-плазменное ускорение электронов

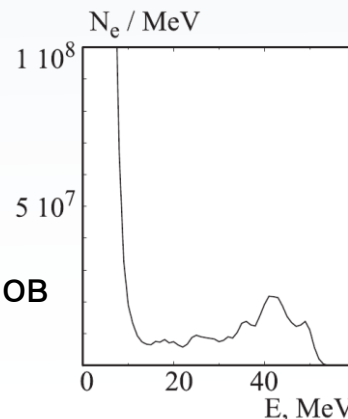
Кильватерное ускорение (LWFA)

- Распространение лазерного импульса (ЛИ) в низкоплотной мишени
- $L < \lambda_p$ (ЛИ короче плазменной волны)
- моноэнергетичный пучок электронов (пКл)



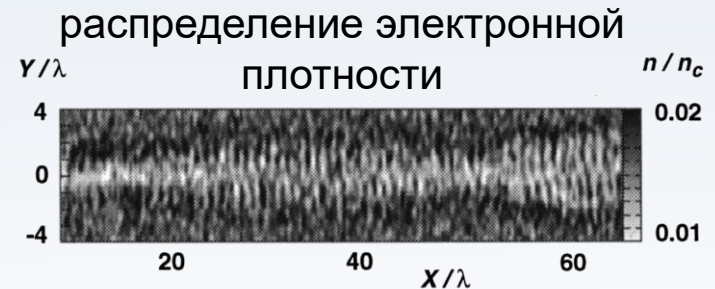
распределение
электронной
плотности

спектр электронов

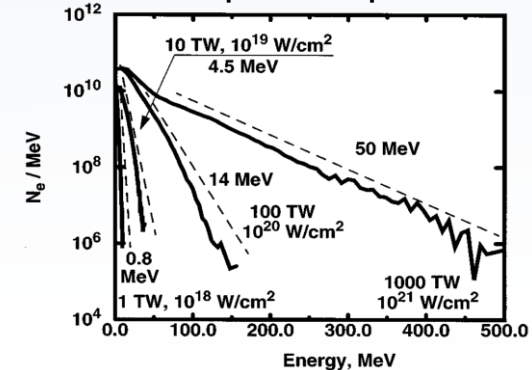


Прямое лазерное ускорение (DLA)

- мишень околоскритической плотности
- $L > \lambda_p$ (длинный лазерный импульс)
- экспоненциальный спектр электронов



спектр электронов

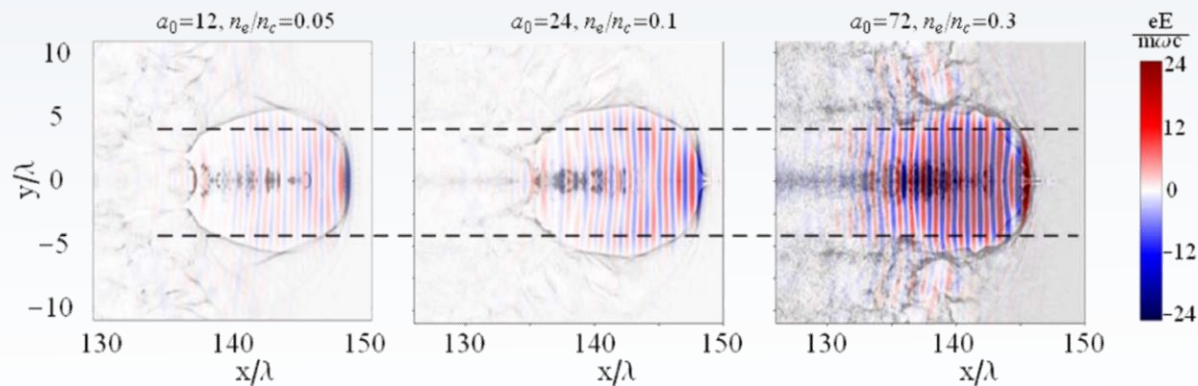


Режим релятивистского самозахвата лазерного импульса

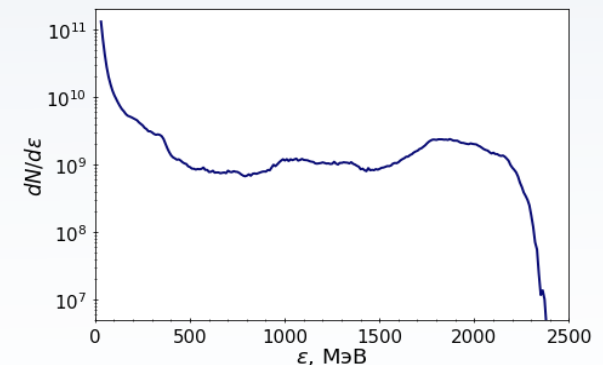
Условие согласования радиуса лазерного пучка, безразмерной амплитуды и плотности мишени:

$$R = \alpha \frac{c\sqrt{a_0}}{\omega_p} = \frac{\alpha c}{\omega_l} \sqrt{\frac{a_0 n_c}{n_e}}$$

Дифракционная расходимость уравнивается релятивистской нелинейностью → радиус лазерного пучка примерно сохраняется при его распространении на многие рэлеевские длины. Платообразный спектр ускоренных электронов. Высокий заряд быстрых частиц (десятки нКл).



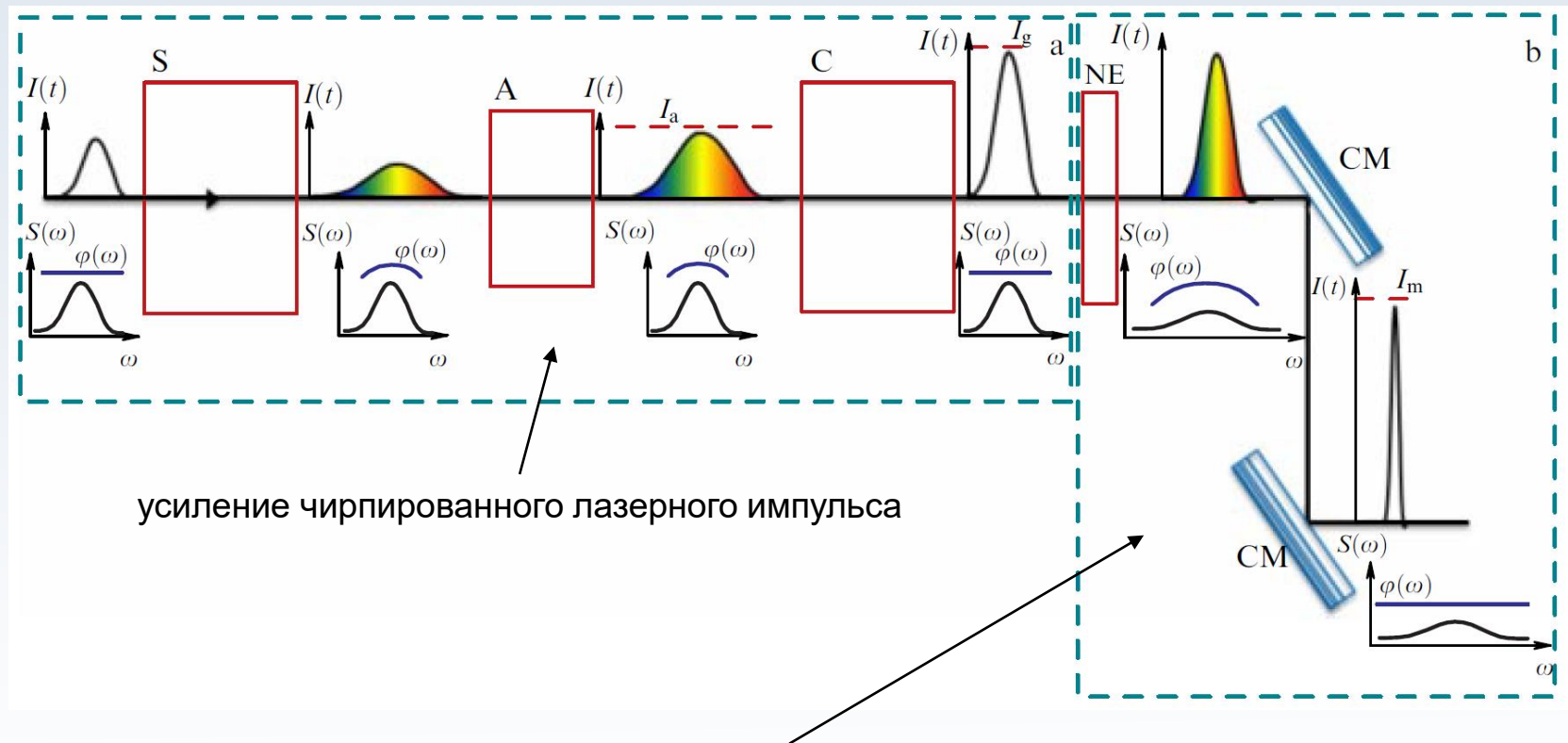
распределение электронной плотности и электрического поля
лазерного импульса в плоскости поляризации



спектр электронов

Мотивация

Увеличение мощности лазерного импульса путем его посткомпрессии



CafCA ("Compression after Compression Approach"): уширение спектра в кристалле с кубической нелинейностью ($n = n_0 + n_2 I$) → chirпированный лазерный импульс с уширенным спектром → сжатие chirпированными зеркалами → спектрально ограниченный короткий импульс

Теоретические оценки

Заряд ускоренных электронов

Предотвращение развития неустойчивостей:

$$L = c\tau \lesssim \lambda_p, \quad \text{или} \quad \omega_l \tau \lesssim \sqrt{a_0 n_{cr}/n_e},$$

В более плотной плазме больший заряд:

$$n_e/n_{cr} \lesssim a_0/(\omega_l \tau)^2 \rightarrow n_e/n_{cr} \sim a_0/(\omega_l \tau)^2$$

Радиус лазерного импульса практически равен его длине:

$$R \sim c\tau$$

Связь ускоренного заряда с длительностью лазерного импульса:

$$Q_0 \propto e n_e R^3 \propto a R \propto \sqrt{W_L/\tau}$$

Теоретические оценки

Характерные энергии

Энергия частицы после ускорения электрическим полем:

$$\varepsilon_{max} \approx eEl_{acc}$$

Характерное поле плазменной полости [I. Kostyukov et al., Phys. Plasmas **14**, 5256 (2004)]:

$$E \sim (mc\omega_p/e) k_p R = (mc^2/e) (\omega_p/c)^2 R \sim n_e R$$

Длина ускорения частицы:

$$L_{deph} \sim R/(1 - v_g/c)$$

$$l_{acc} \sim a_0 \tau / n_e$$

$$v_g \approx c \sqrt{1 - n_e / \gamma n_c}$$

Характерные энергии электронов:

$$\varepsilon_{max} \propto a_0 R \tau \propto (W_L \tau)^{1/2}$$

Моделирование

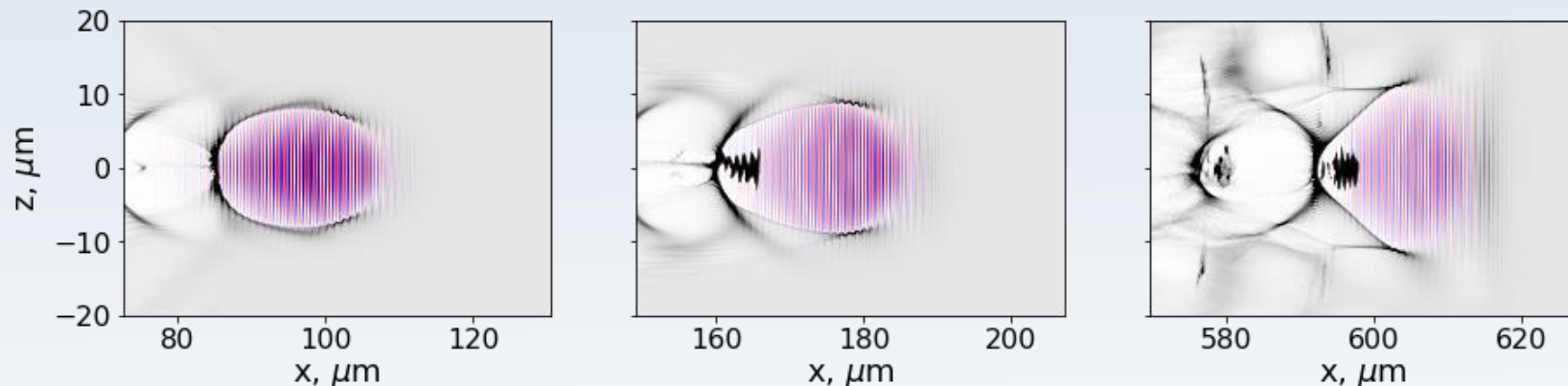
Лазерный импульс: $\lambda_l = 1$ мкм, $W = 4.6$ Дж.

параметры расчетов

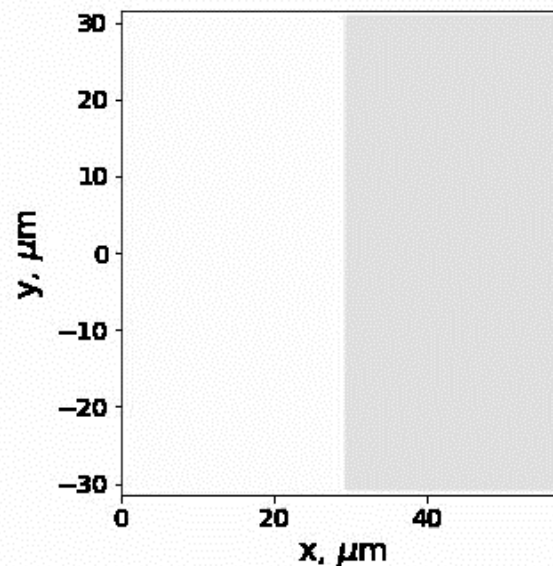
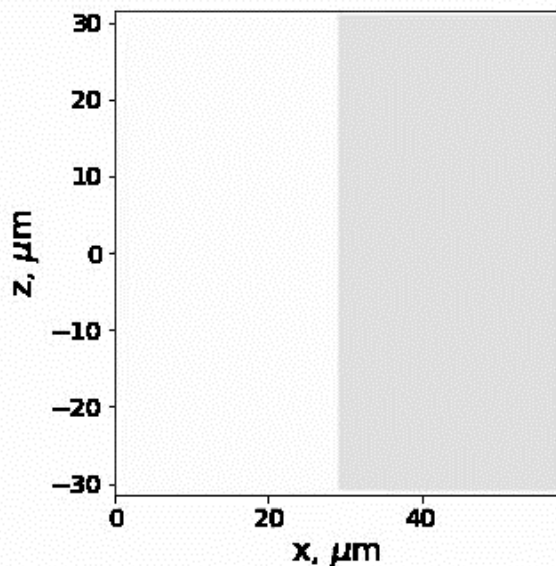
τ , фс	P , ТВт	D_F , мкм	a_0	I_p , Вт/см ²	n_e/n_c	n_e , см ⁻³
10	430	4	41.6	2.4×10^{21}	0.15	1.67×10^{20}
40	110	4	20.8	6.0×10^{20}	0.13	1.45×10^{20}
40	110	8	10.4	1.5×10^{20}	0.005	5.57×10^{18}

Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс в низкоплотной мишени

распределение электронной плотности и электрического поля лазерного импульса в плоскости поляризации ($a_0 = 10$, $n_e = 0.005 n_c$)

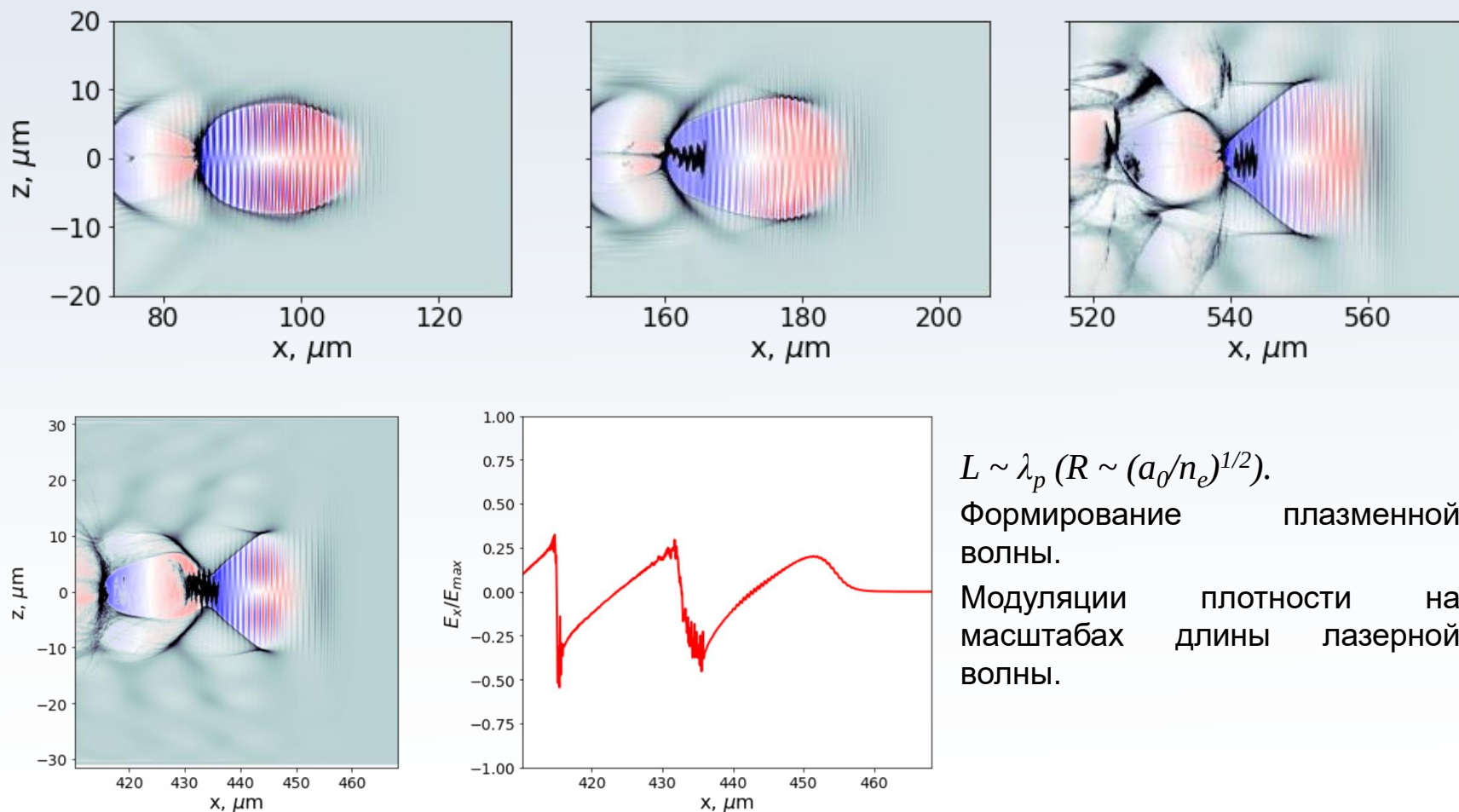


$\tau = 40.0 \text{ fs}$, $n_e = 0.005 n_c$



Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс в низкоплотной мишени

распределение электронной плотности и продольного электрического поля
в плоскости поляризации ($a_0 = 10$, $n_e = 0.005n_c$)



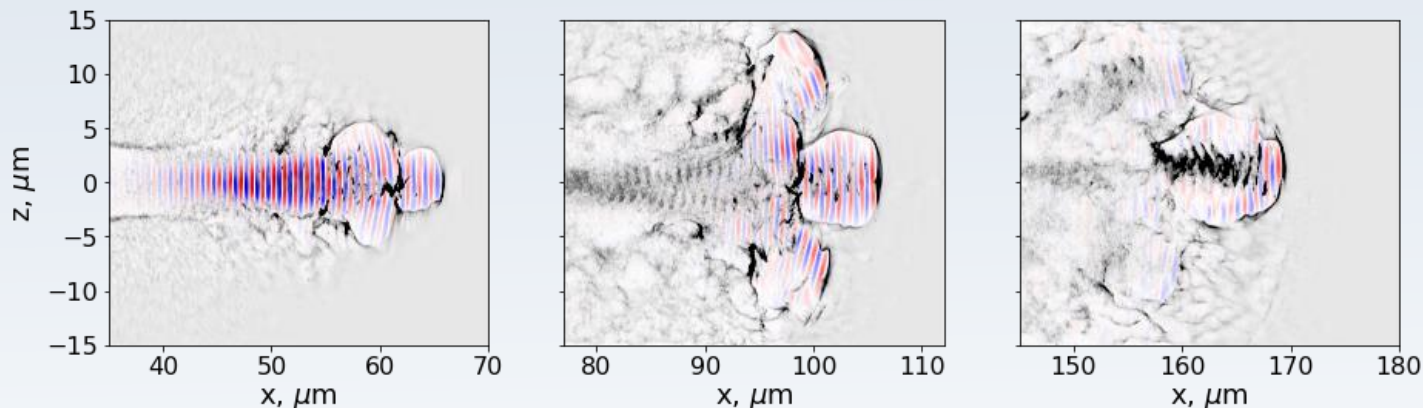
$$L \sim \lambda_p \quad (R \sim (a_0/n_e)^{1/2}).$$

Формирование плазменной волны.

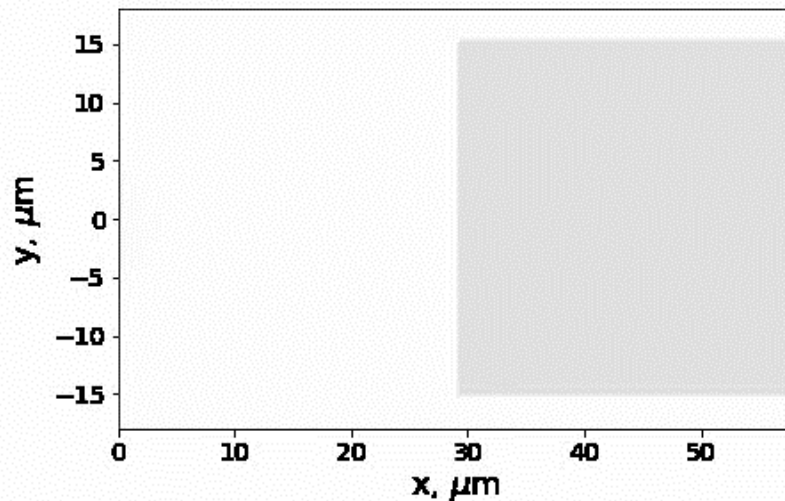
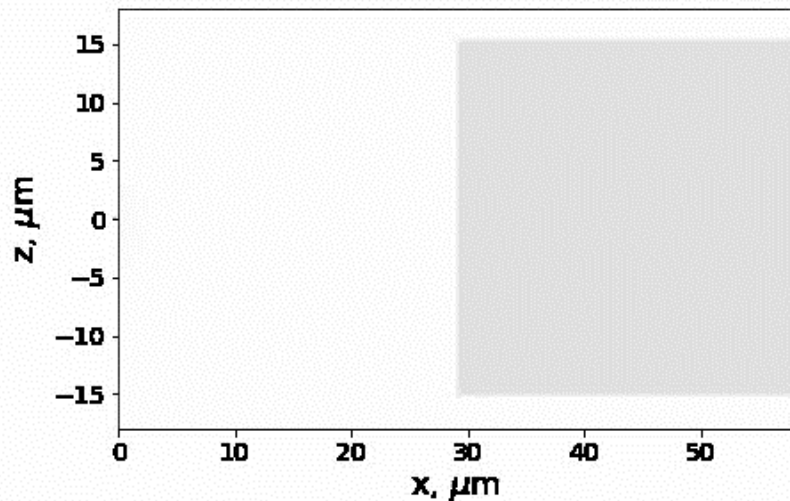
Модуляции плотности на масштабах длины лазерной волны.

Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс

распределение электронной плотности и электрического поля лазерного импульса в плоскости поляризации ($a_0 = 21$, $n_e = 0.13n_c$)

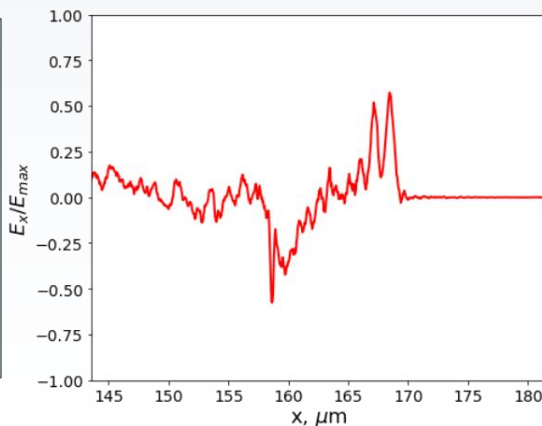
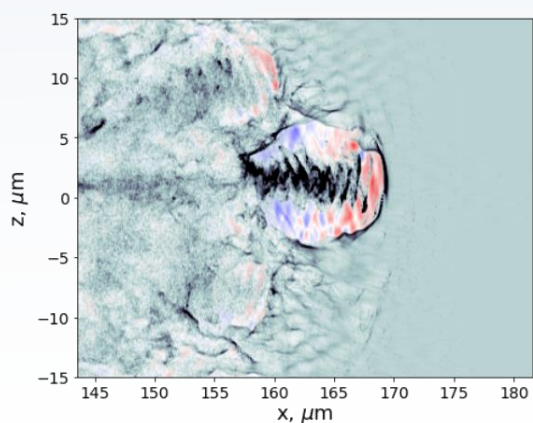
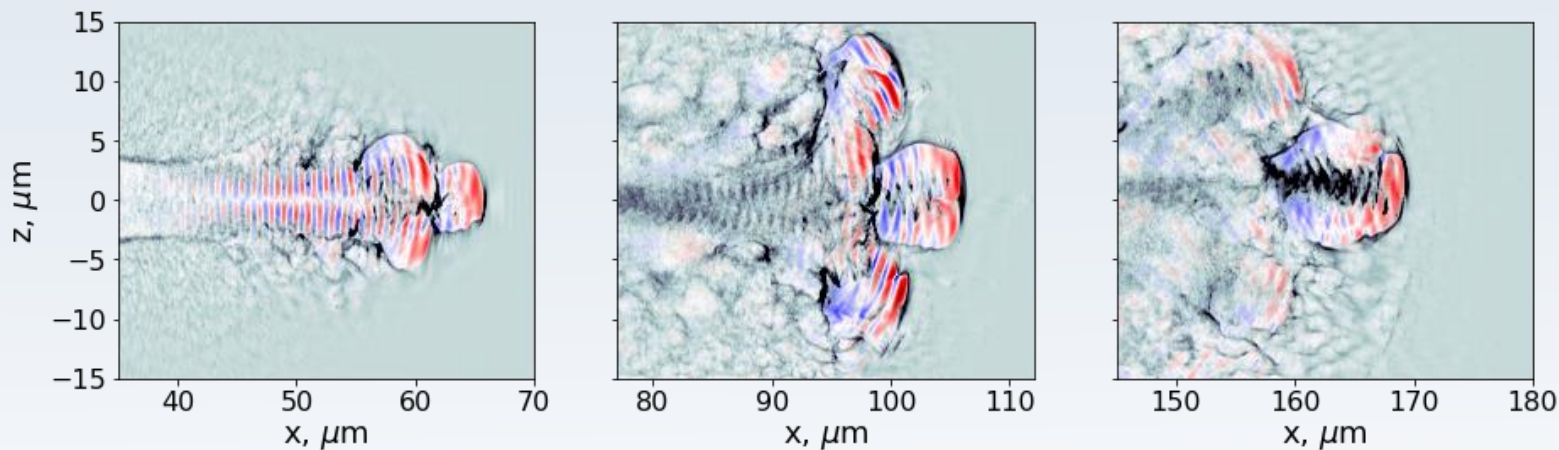


$\tau = 40.0 \text{ fs}$, $n_e = 0.13 n_c$



Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс

распределение электронной плотности и продольного электрического поля
в плоскости поляризации ($a_0 = 21$, $n_e = 0.13n_c$)



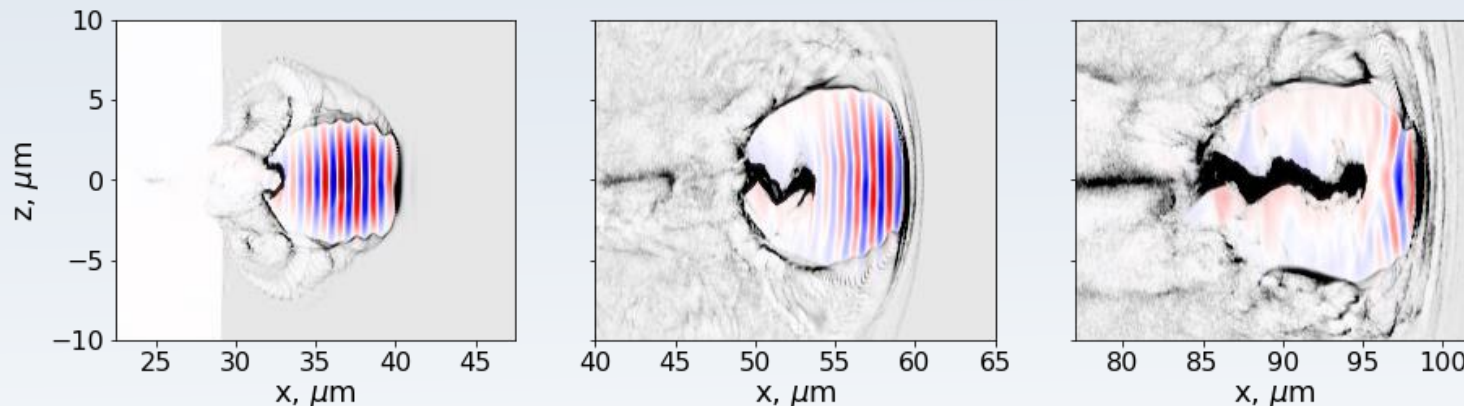
$$L > \lambda_p$$

Формирование филаментов.

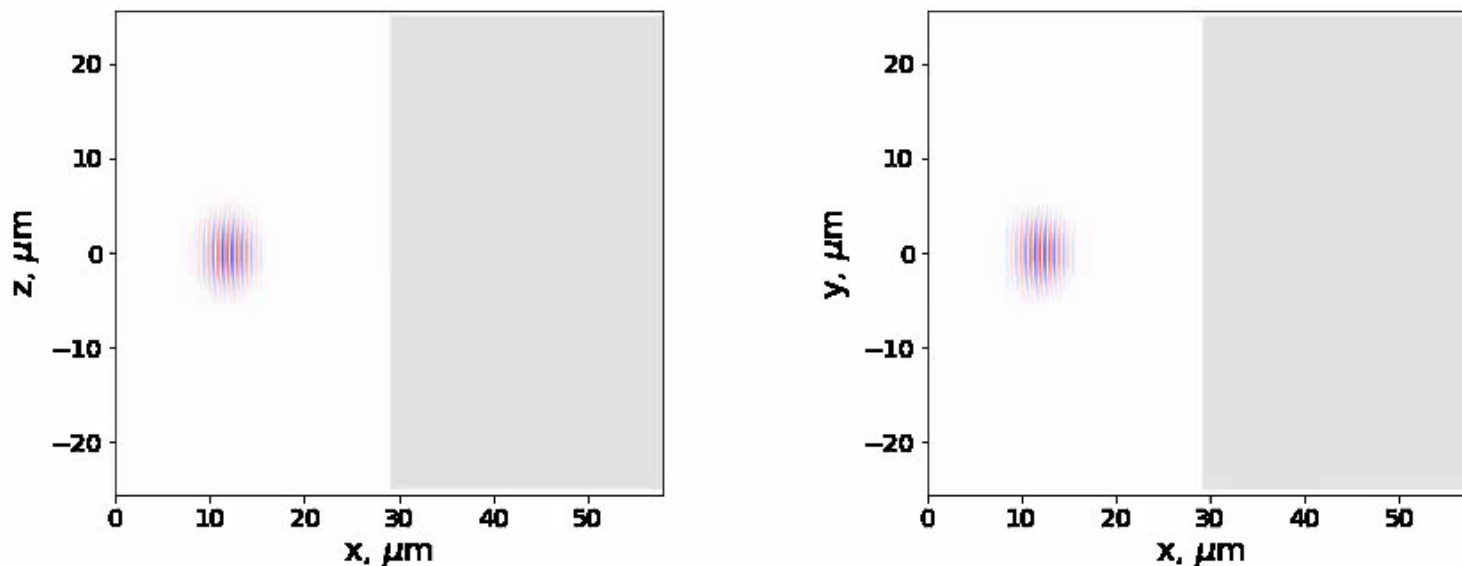
Модуляции плотности на
масштабах длины лазерной
волны.

Распространение лазерного импульса длительностью 10 фс

распределение электронной плотности и электрического поля лазерного импульса в плоскости поляризации ($a_0 = 42$, $n_e = 0.15n_c$)

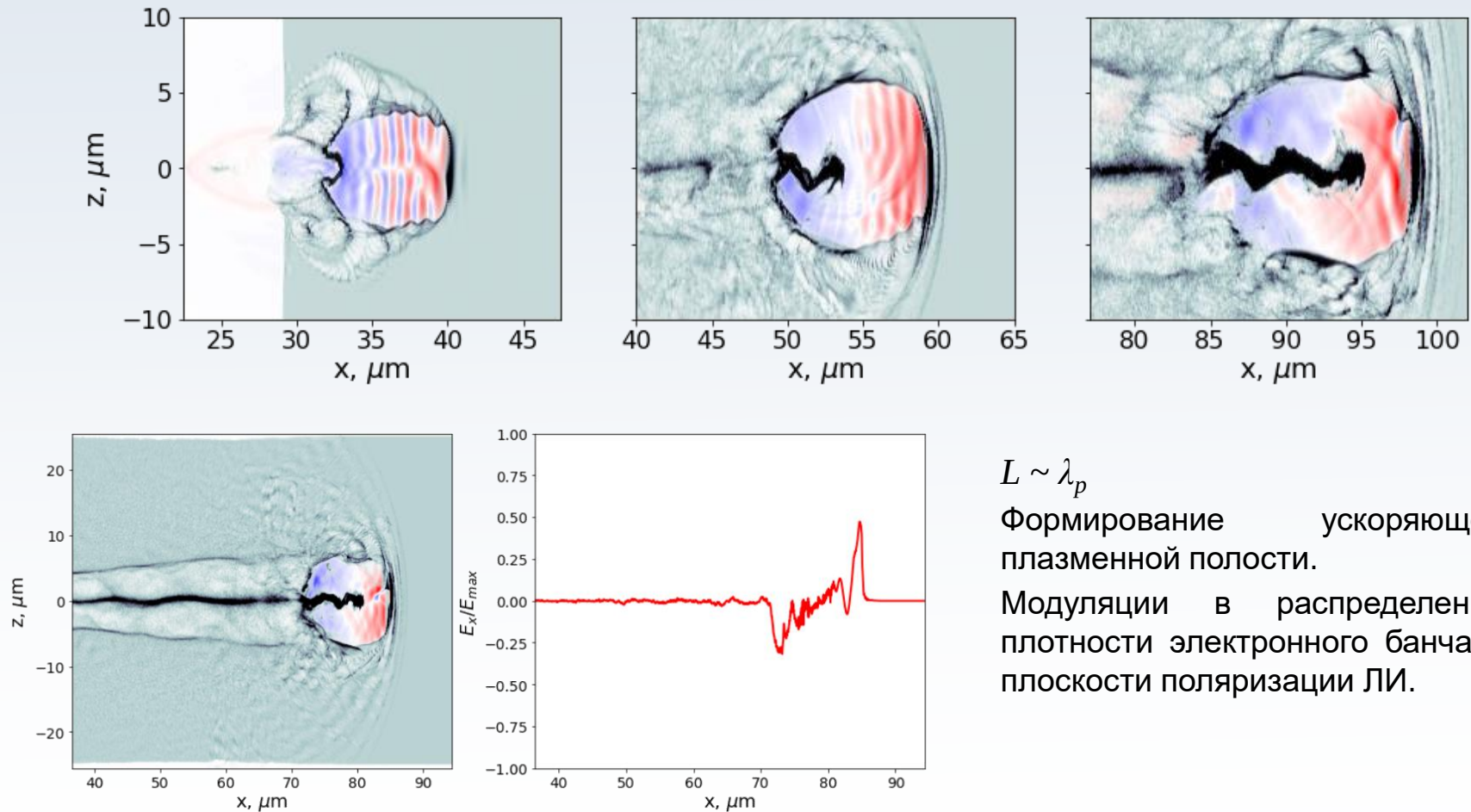


$\tau = 10.0 \text{ fs}$, $n_e = 0.15 n_c$



Распространение лазерного импульса длительностью 10 фс

распределение электронной плотности и продольного электрического поля
в плоскости поляризации ($a_0 = 42$, $n_e = 0.15n_c$)



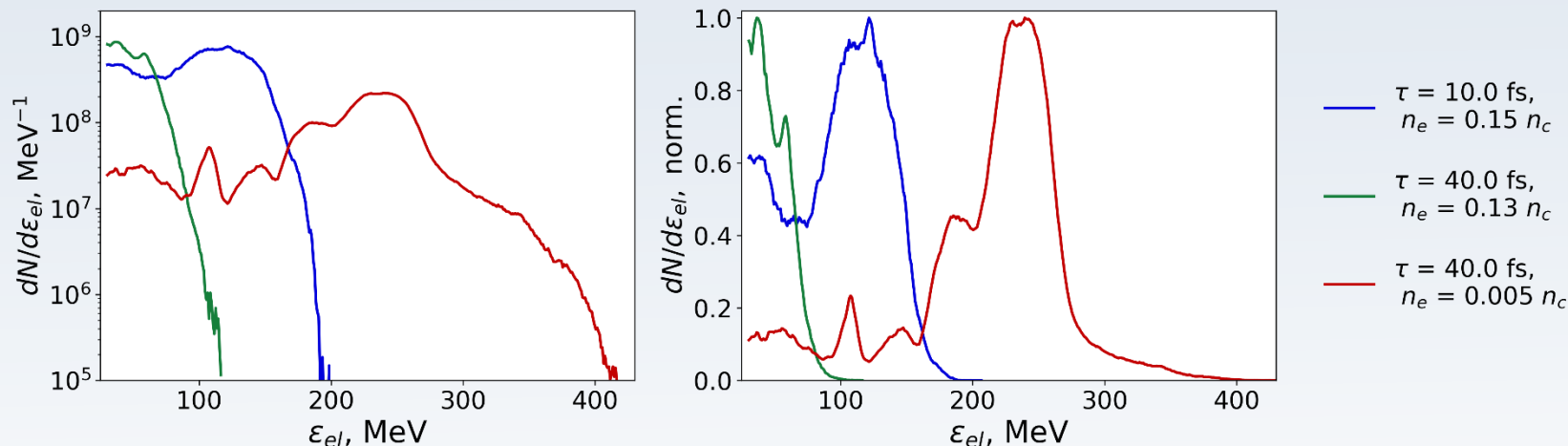
$$L \sim \lambda_p$$

Формирование ускоряющей
плазменной полости.

Модуляции в распределении
плотности электронного банча в
плоскости поляризации ЛИ.

Сравнение результатов для лазерных импульсов различной длительности

Спектры частиц при достижении наибольшей конверсии



характеристики электронного пучка, ускоренного плазменной полостью

параметры	$\epsilon_{max, >30\text{МэВ}}, \text{МэВ}$	$\langle \epsilon_{>30\text{МэВ}} \rangle, \text{МэВ}$	$Q_{>30\text{МэВ}}, \text{нКл}$	$W_{>30\text{МэВ}}, \text{Дж}$
$\tau = 10 \text{ фс},$ $D_F = 4 \text{ мкм}$	280	151	10	1.2
$\tau = 40 \text{ фс},$ $D_F = 4 \text{ мкм}$	160	60	4.4	0.25
$\tau = 40 \text{ фс},$ $D_F = 8 \text{ мкм}$	420	200	1.5	0.19

Моделирование

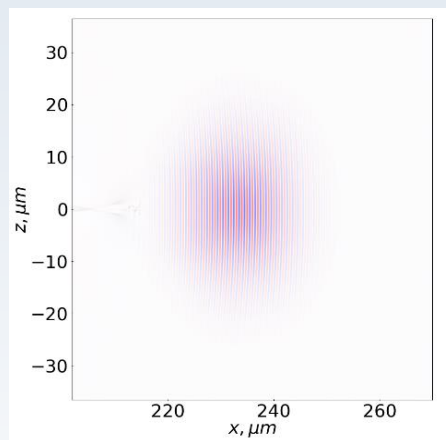
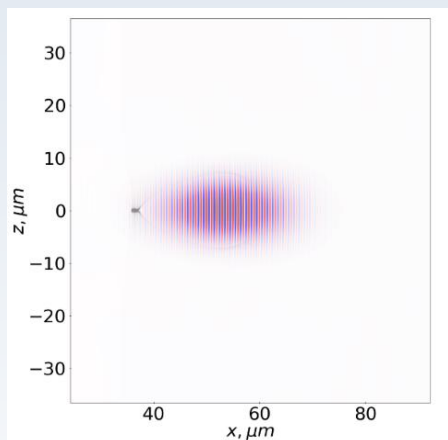
Лазерный импульс: $\lambda_l = 0.8$ мкм, $W = 0.85$ Дж.

параметры расчетов

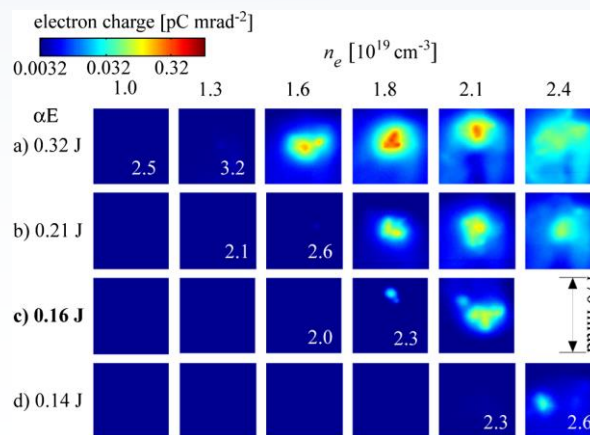
$t, \text{фс}$	$P, \text{ТВт}$	$D_F, \text{мкм}$	a_0	$I_p, \text{Вт/см}^2$	n_e/n_c	$n_e, \text{см}^{-3}$
10	80	4	14.3	4.4×10^{20}	0.067	1.17×10^{20}
40	20	4	7.14	1.1×10^{20}	0.033	5.74×10^{19}
40	20	8	3.57	2.76×10^{19}	0.006	1.04×10^{19}

Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс в малоплотной плазме

распределение электронной плотности и электрического поля
лазерного импульса в плоскости поляризации ($n_e = 0.0015n_c$)



[S.P.D. Mangles et al.,
Self-injection threshold in self-guided
laser wakefield accelerators,
Phys. Rev. ST Accel. Beams 15,
011302 (2012)]



Теоретические оценки

Ограничение длительности лазерного импульса для его стабильного распространения

Устойчивое распространение лазерного импульса:

релятивистская самофокусировка:

$$R \sim \lambda_p \text{ и } a_0 \gg 1$$

без самомодуляции:

$$c\tau \lesssim \lambda_p$$

Ограничение на длительность импульса:

$$a_0 = \sqrt{W_L^*/R^2 c\tau} \gg 1, \text{ где } W_L^* = a_0^2 R^2 c\tau$$

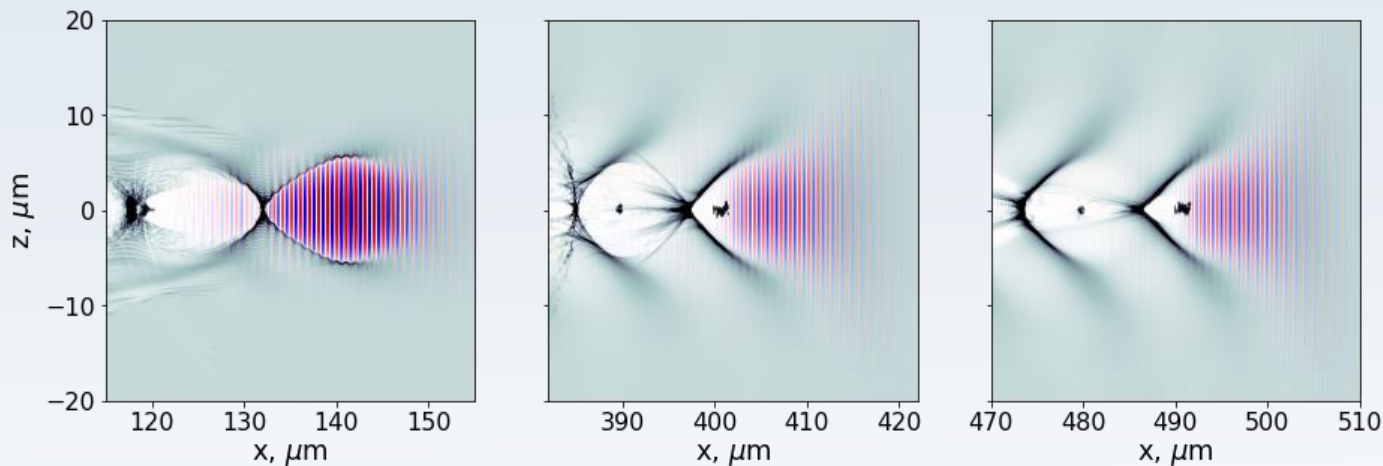
$$c\tau \lesssim R$$

$$c\tau \lesssim R \ll \sqrt{W_L^*/c\tau} \longrightarrow \sqrt{W_L^*/(c\tau)^3} \gg 1$$

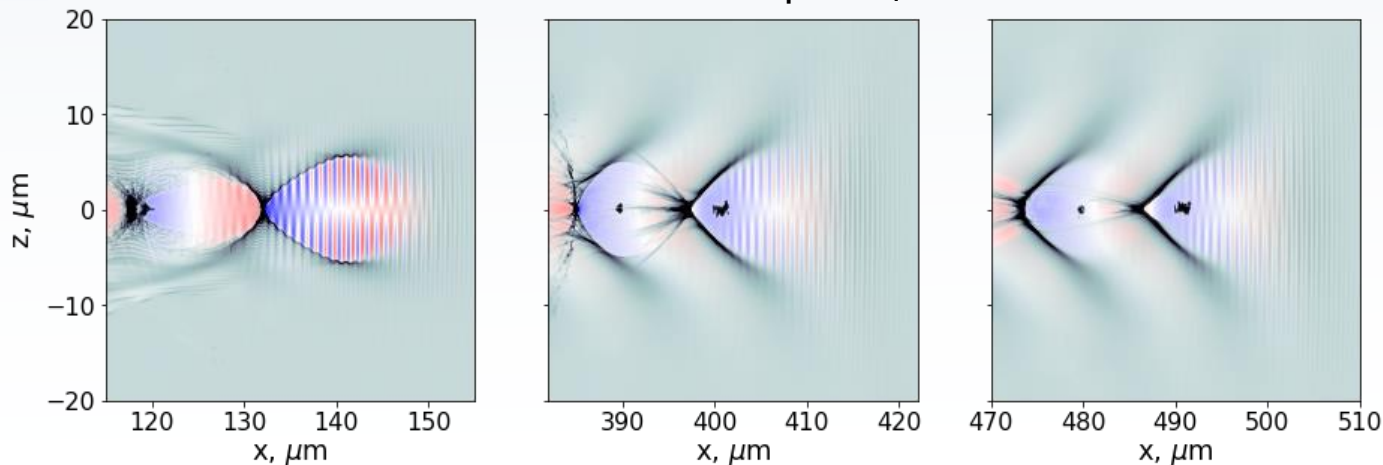
Ограничение длительности для лазерной самофокусировки: 1Дж, 30фс в экспериментальной работе
[Faure J. et al., A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams, Nature **431**, 541 (2004)]

Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс в малоплотной плазме

распределение электронной плотности и электрического поля
лазерного импульса в плоскости поляризации ($a_0 = 3.57$, $n_e = 0.006n_c$)



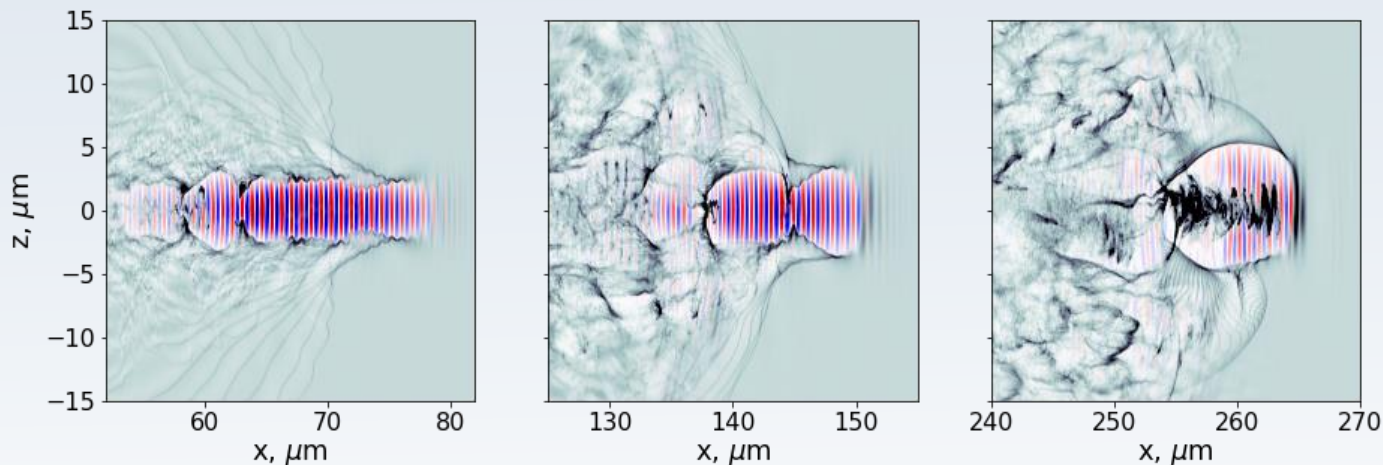
распределение электронной плотности и продольного электрического поля
в плоскости поляризации



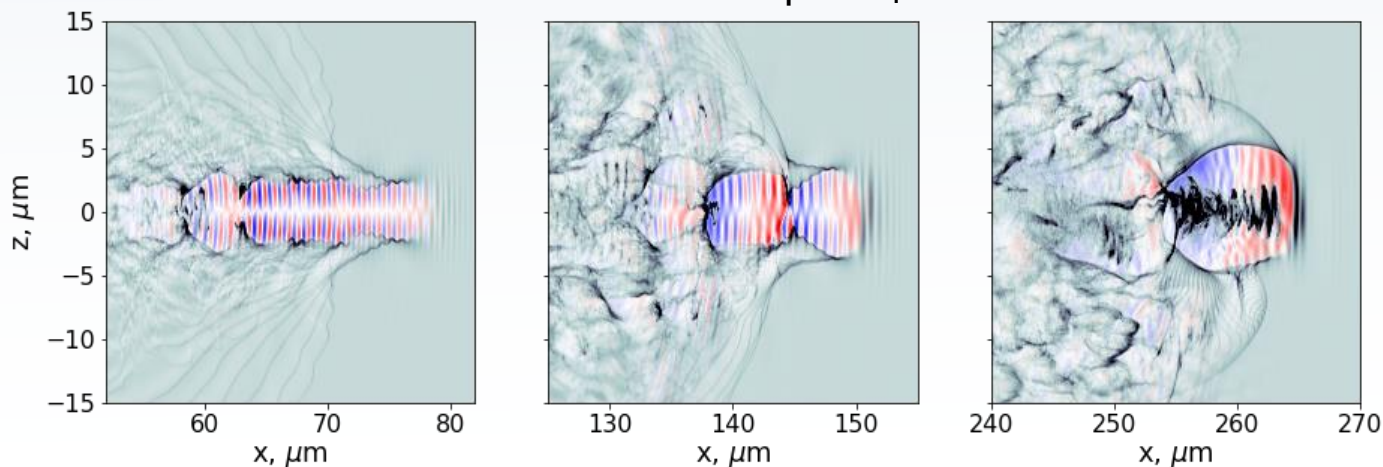
$$L \sim \lambda_p$$

Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс

распределение электронной плотности и электрического поля лазерного импульса в плоскости поляризации ($a_0 = 7.14$, $n_e = 0.033n_c$)



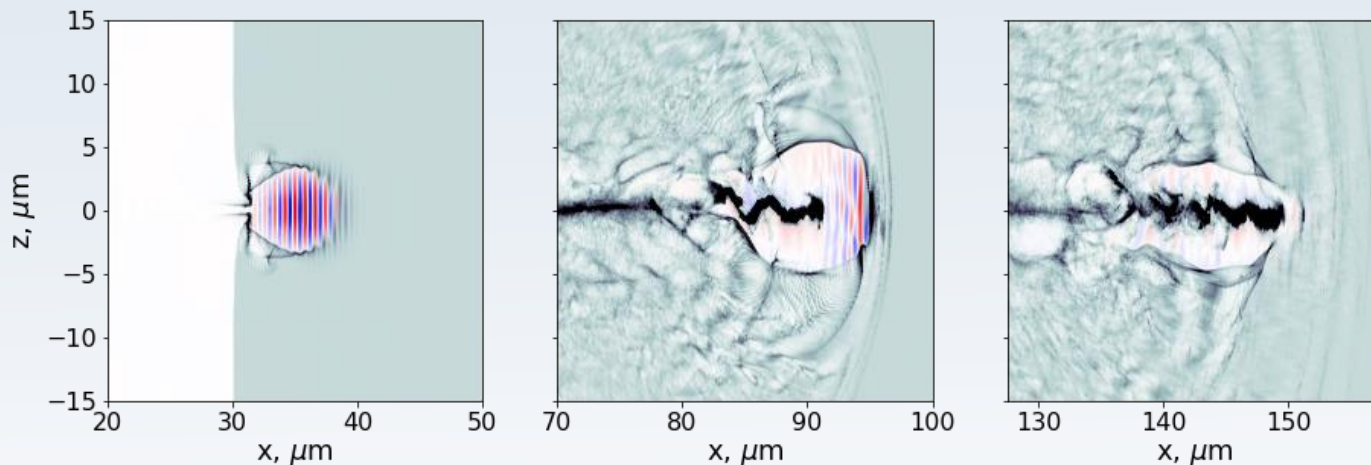
распределение электронной плотности и продольного электрического поля
в плоскости поляризации



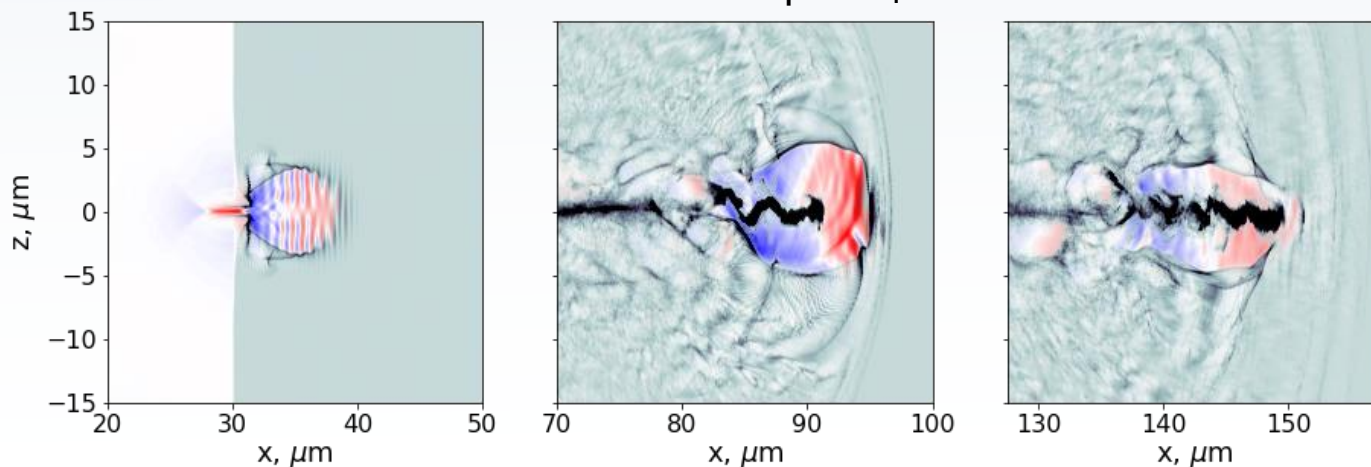
$$L > \lambda_p$$

Распространение лазерного импульса длительностью 10 фс

распределение электронной плотности и электрического поля лазерного импульса в плоскости поляризации ($a_0 = 14.3$, $n_e = 0.067n_c$)



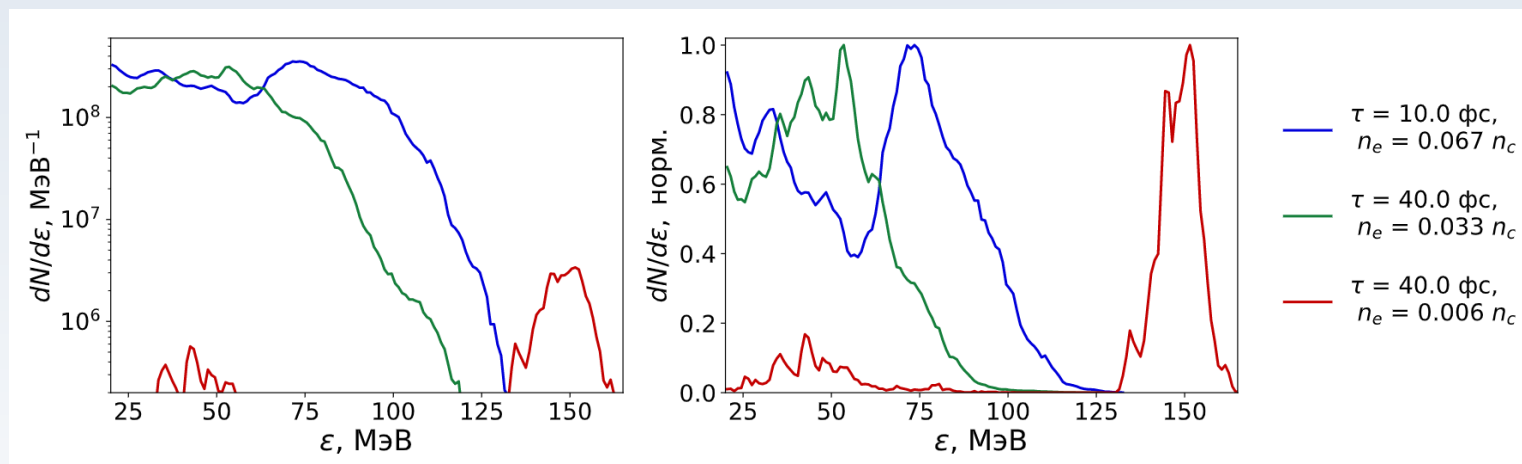
распределение электронной плотности и продольного электрического поля
в плоскости поляризации



$$L \sim \lambda_p$$

Сравнение результатов для лазерных импульсов различной длительности

Спектры частиц при достижении наибольшей конверсии



характеристики электронного пучка, ускоренного плазменной полостью

параметры	$\varepsilon_{\text{max}, > 20 \text{ MэВ}}, \text{MэВ}$	$\langle \varepsilon_{> 20 \text{ MэВ}} \rangle, \text{MэВ}$	$Q_{> 20 \text{ MэВ}}, \text{нКл}$	$W_{> 20 \text{ MэВ}}, \text{мДж}$
$\tau = 10 \text{ фс},$ $D_F = 4 \text{ мкм}$	120	70	3.1	200
$\tau = 40 \text{ фс},$ $D_F = 4 \text{ мкм}$	90	55	2.0	100
$\tau = 40 \text{ фс},$ $D_F = 8 \text{ мкм}$	160	130	0.01	1

Заключение

- При распространении лазерного импульса в режиме релятивистского самозахвата более короткие импульсы имеют больший коэффициент конверсии в энергию высокоэнергетичных частиц, что обусловлено возможностью использовать более плотные мишени, которые позволяют ускорить больший суммарный заряд электронов.
- При распространении лазерного импульса в низкоплотных мишенях значения характерных энергий распределений частиц оказываются выше.
- Использование более короткого импульса заданной энергии позволяет избежать как филаментацию лазерного пучка (в случае плазмы околоритической плотности, т.к. $L < \lambda_p$), так и формирования плазменных волн (которые возникают в низкоплотных мишенях).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!