



ВНИИА
РОСАТОМ

Влияние длительности импульса при релятивистском самозахвате экстремального лазерного света

М.Г. Лобок, О.Е. Вайс, В.Ю. Быченков

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

Забабахинские научные чтения

31.05.2023

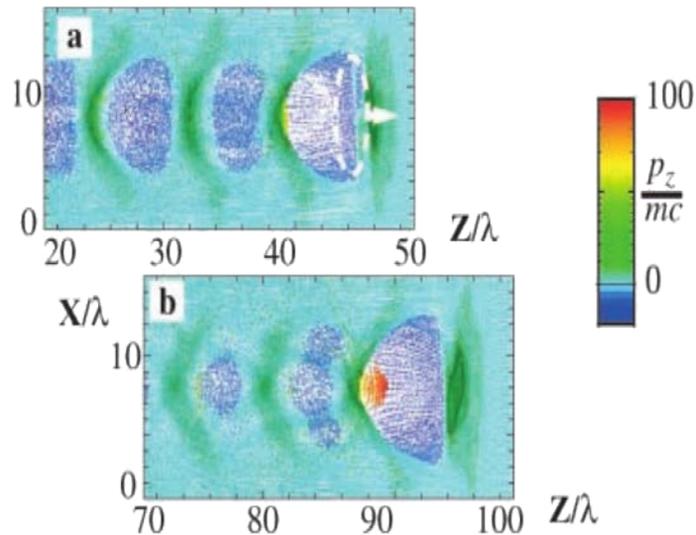
Лазерно-плазменное ускорение электронов



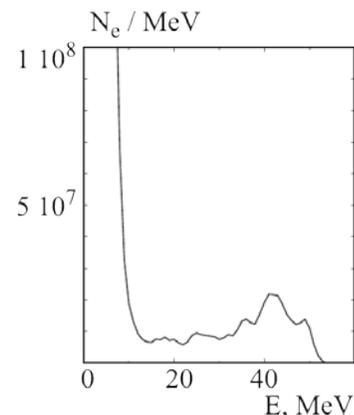
Кильватерное ускорение (LWFA)

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

распределение электронной плотности



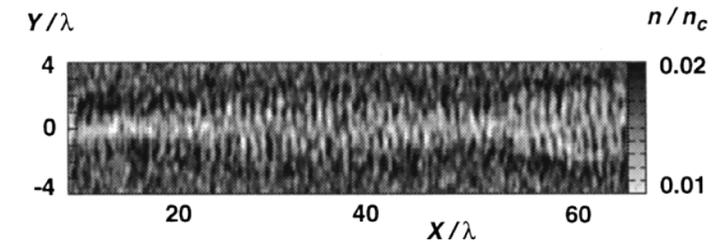
спектр электронов



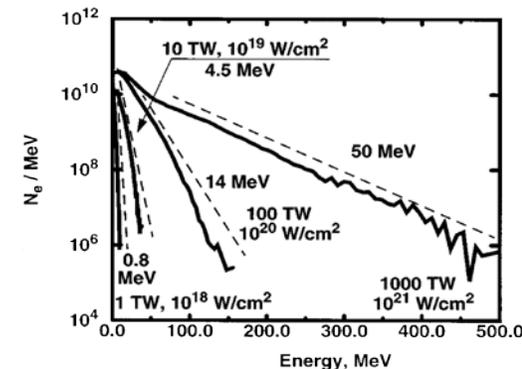
Прямое лазерное ускорение (DLA)

- Мишень околоритической плотности
- $L > \lambda_p$ (длинный лазерный импульс)
- экспоненциальный спектр электронов

распределение электронной плотности



спектр электронов



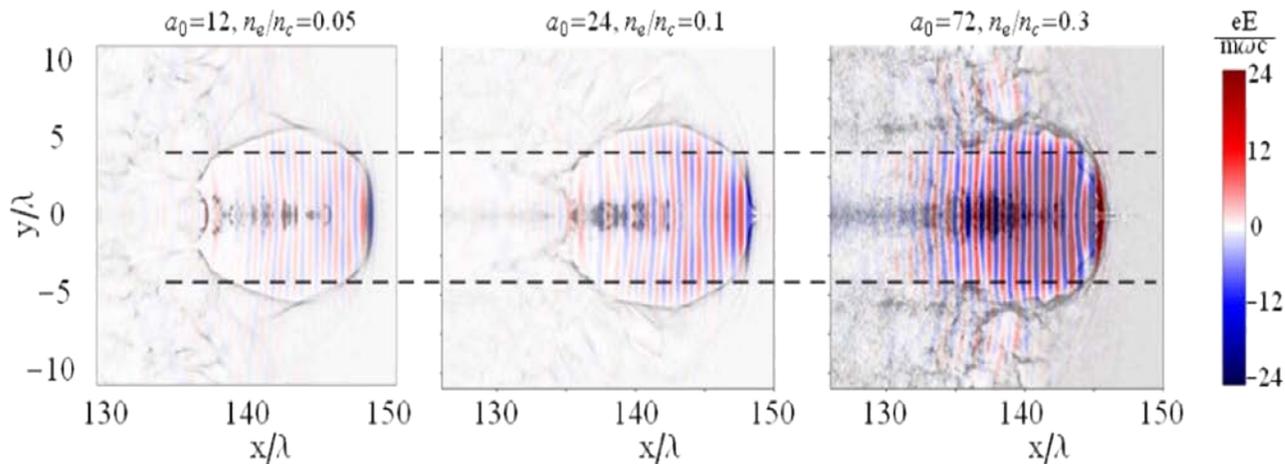
Режим релятивистского самозахвата лазерного импульса



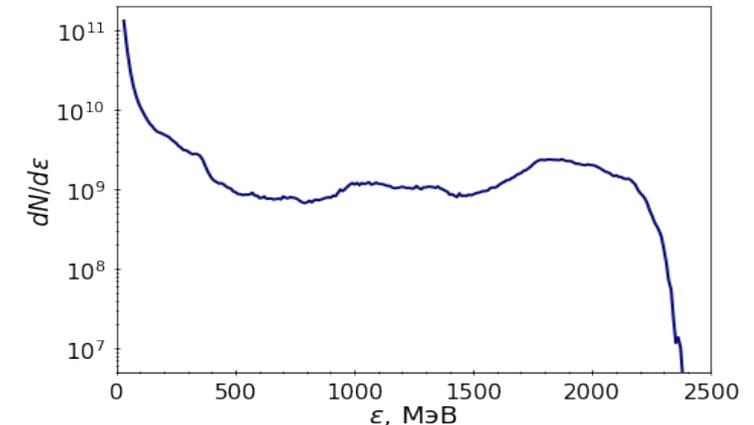
Условие согласования радиуса лазерного пучка, безразмерной амплитуды и плотности мишени:

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

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

Моделирование



3D-PIC расчет (Vsim) в режиме бегущего окна.

Параметры лазерного импульса:

линейная поляризация, $\lambda_l = 1$ мкм, $W = 4.6$ Дж.

Анализ целесообразности использования посткомпрессии лазерных импульсов (CafCa, PEARL, ИПФ РАН)

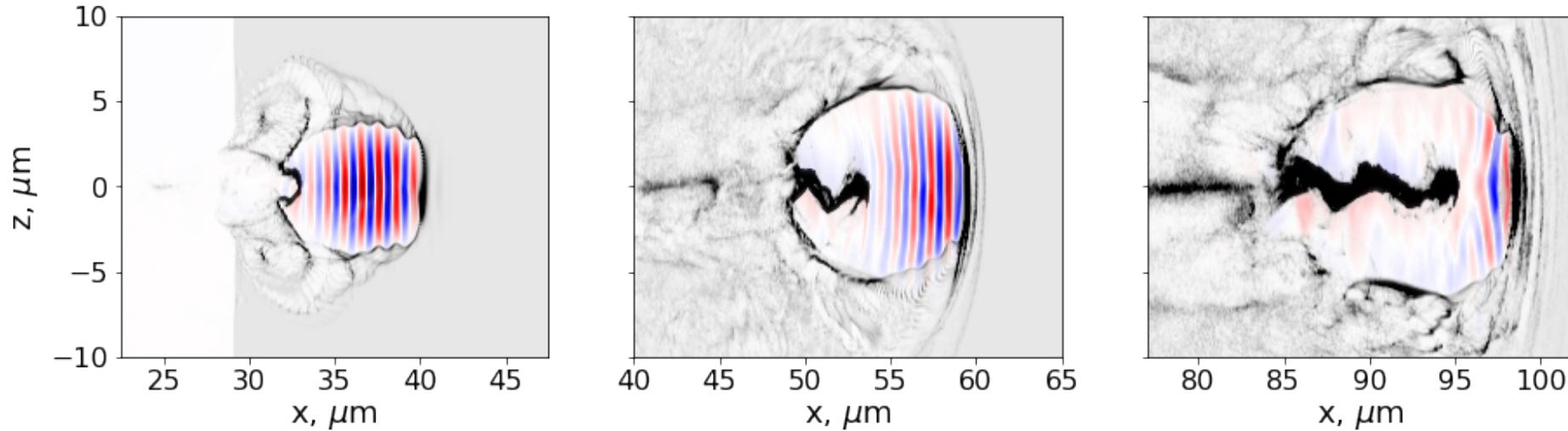
параметры, изменяемые в расчетах

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}

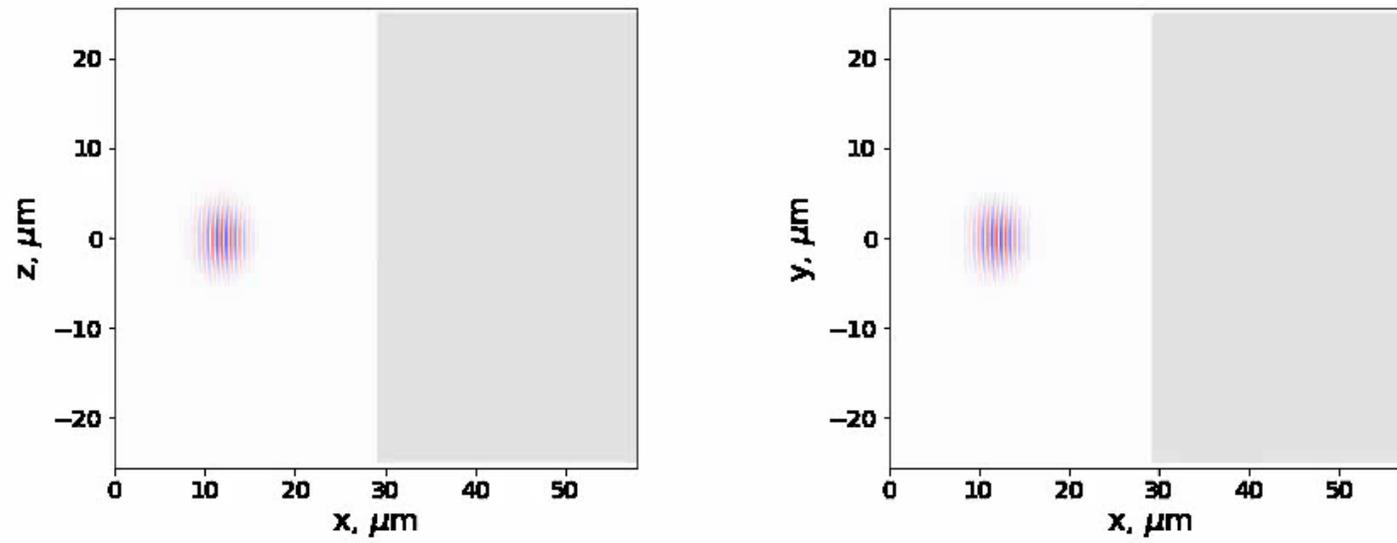
Распространение лазерного импульса длительностью 10 фс



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



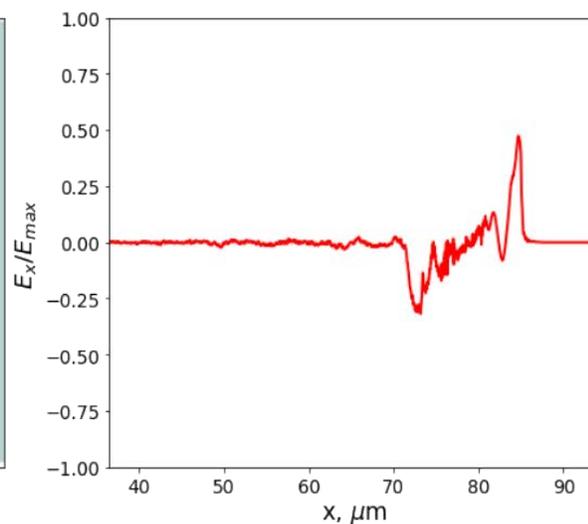
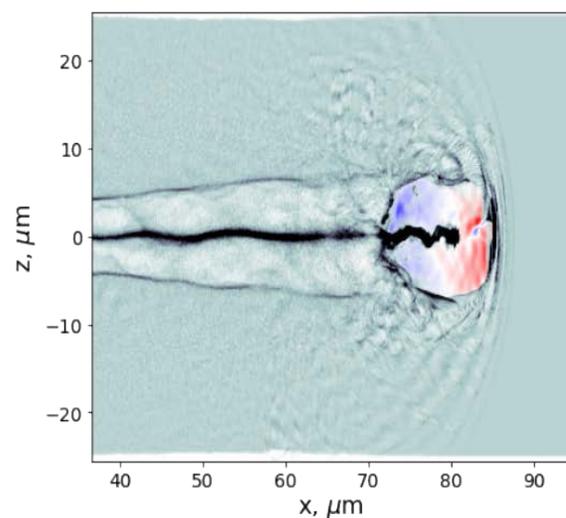
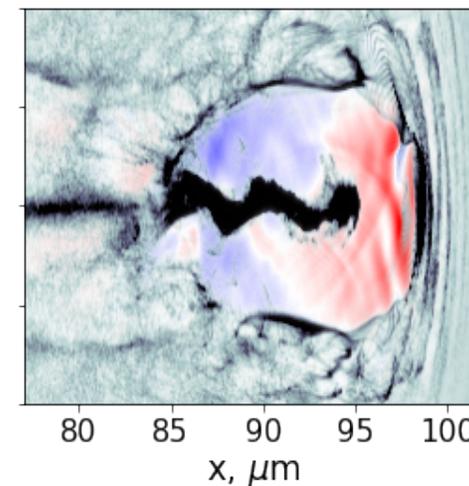
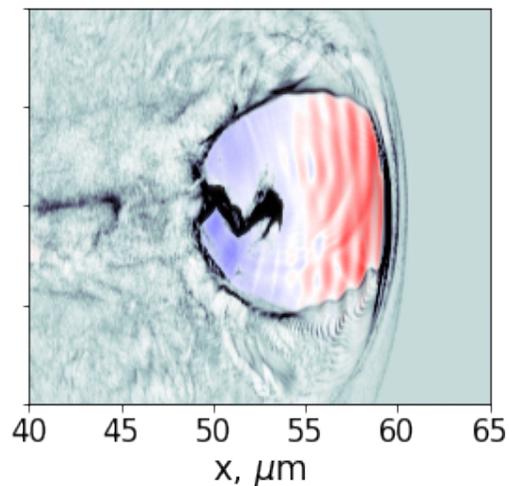
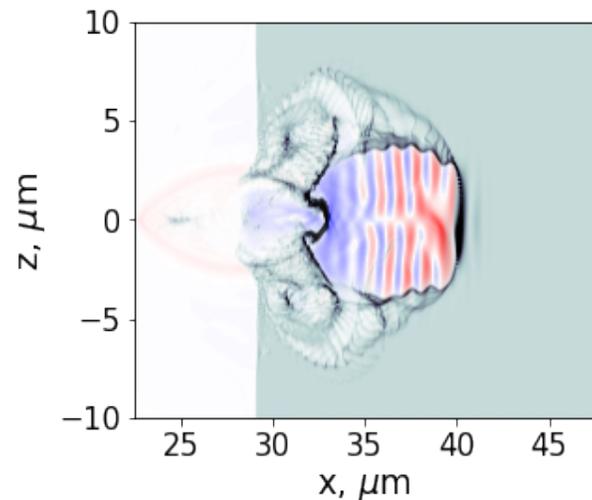
$\tau = 10.0 \text{ fs}$, $n_e = 0.15 n_c$



Распространение лазерного импульса длительностью 10 фс



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



$$L \sim \lambda_p/2.$$

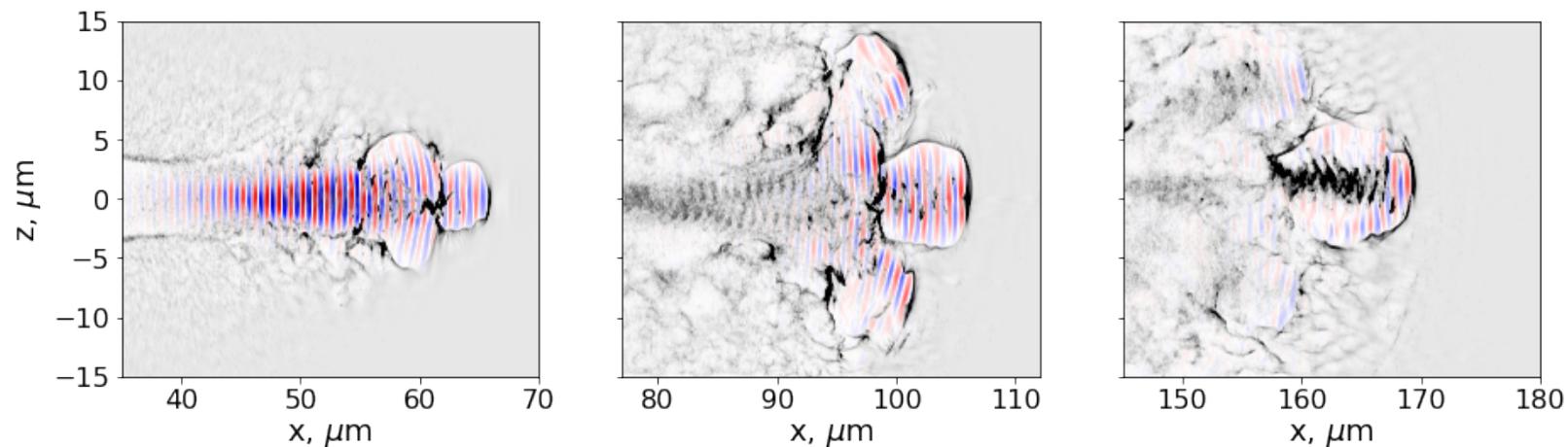
Формирование ускоряющей
плазменной полости.

Модуляции в распределении
плотности электронного
банча в плоскости
поляризации ЛИ.

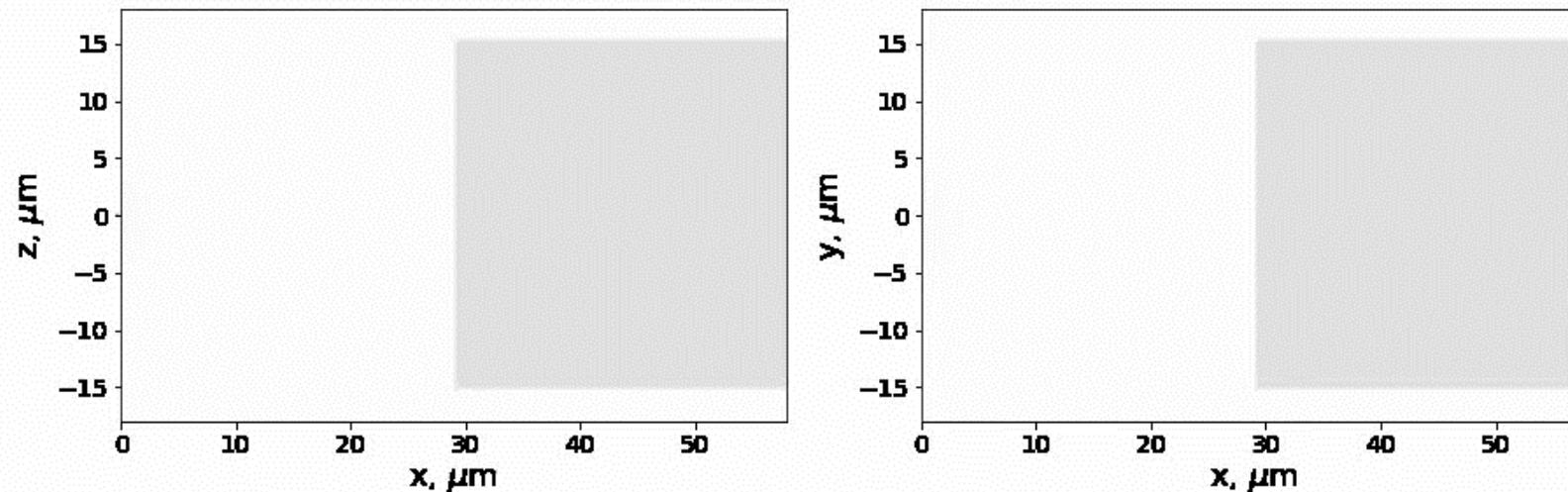
Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс



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



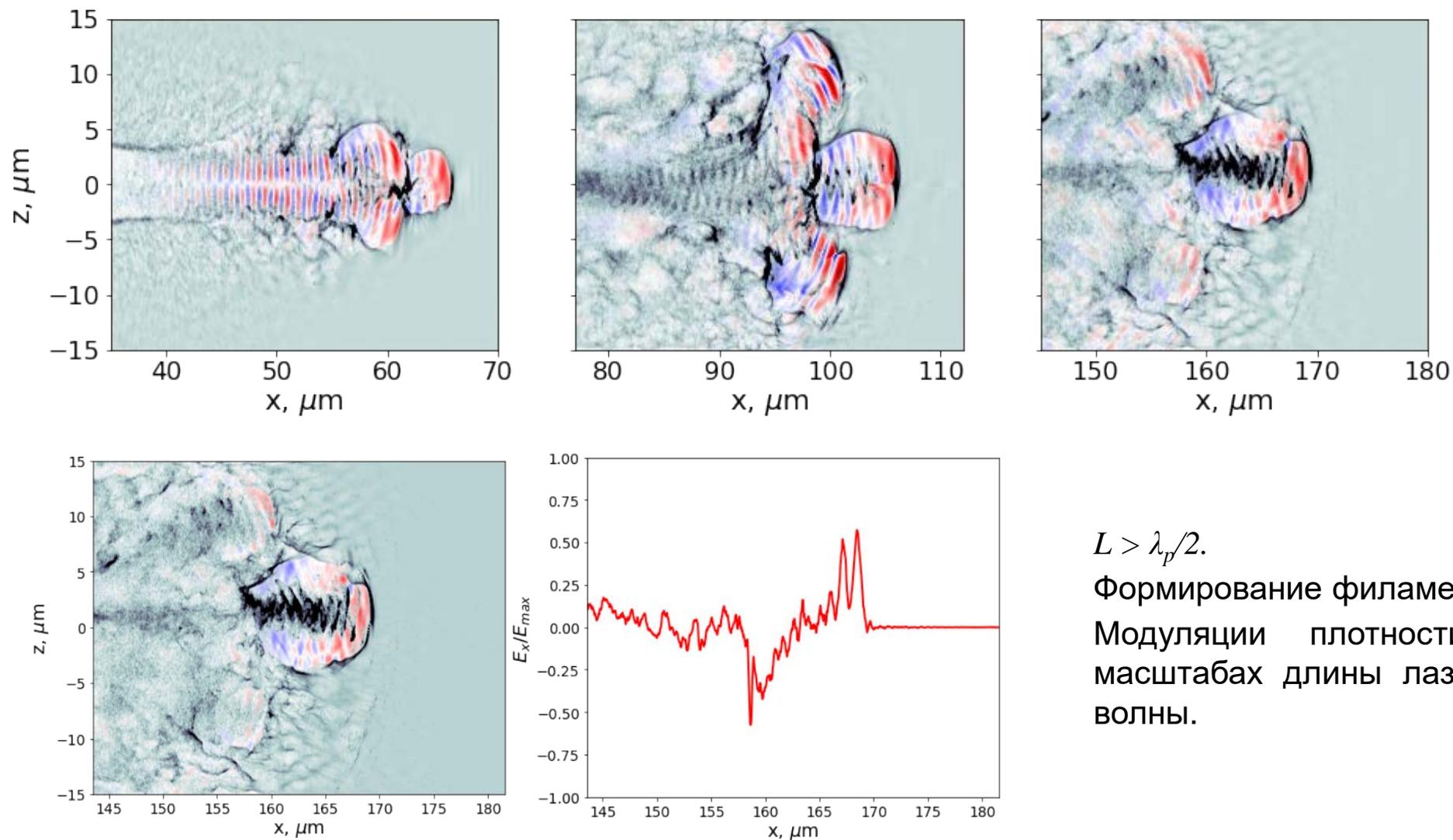
$\tau = 40.0 \text{ fs}$, $n_e = 0.13 n_c$



Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс



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



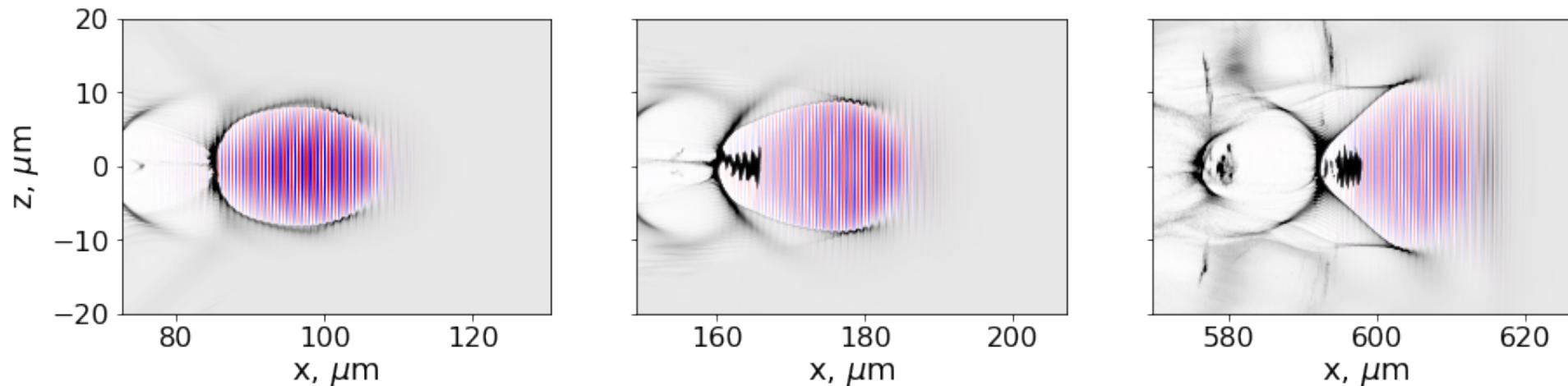
$$L > \lambda_p/2.$$

Формирование филаментов.
Модуляции плотности на
масштабах длины лазерной
волны.

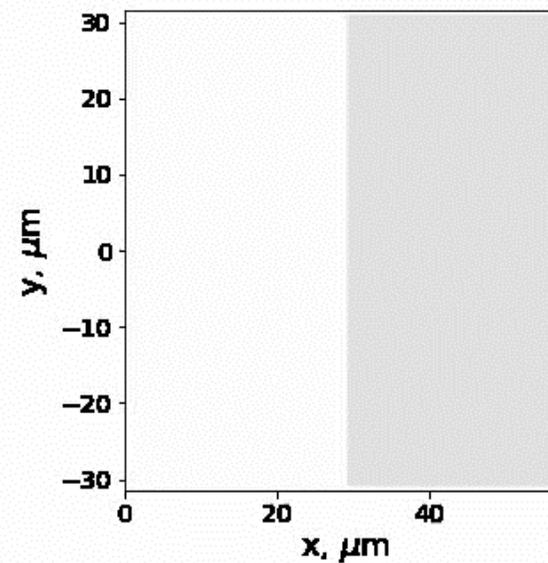
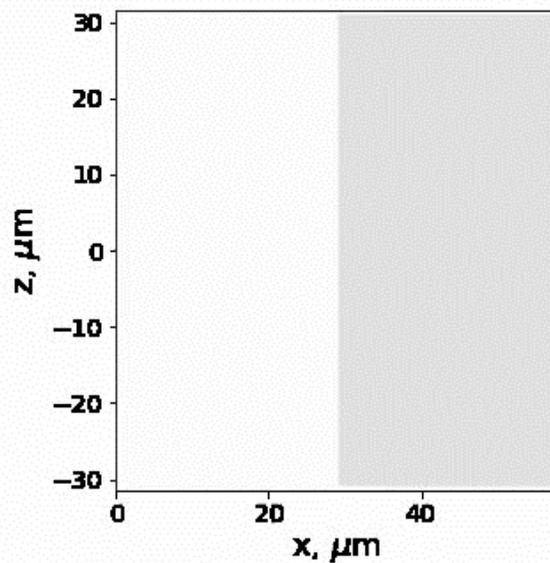
Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс



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



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

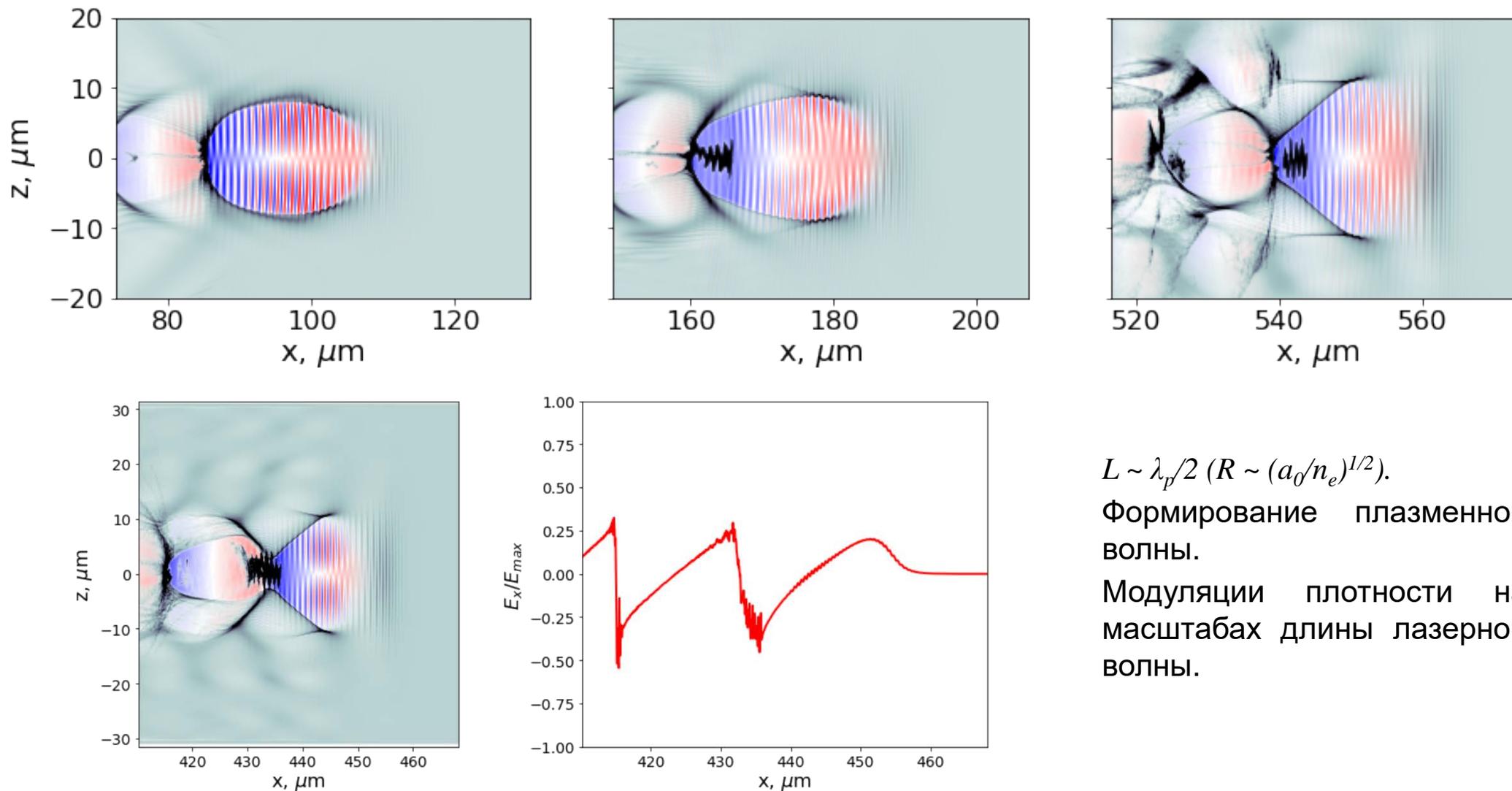


Распространение лазерного импульса длительностью 40 фс



ВНИИА
РОСАТОМ

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



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

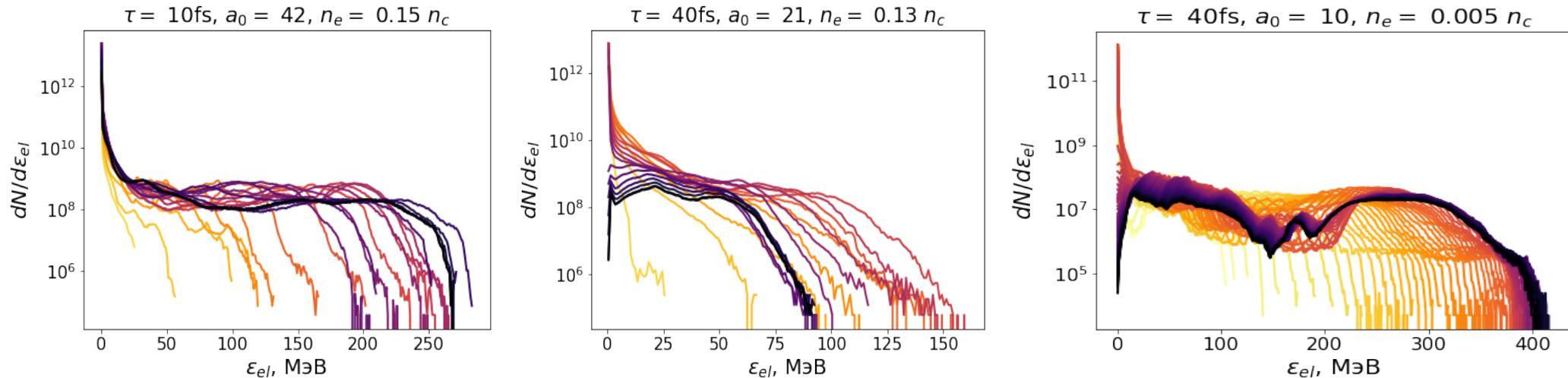
Формирование плазменной волны.

Модуляции плотности на масштабах длины лазерной волны.

Сравнение результатов для лазерных импульсов различной длительности



динамика спектров частиц при распространении лазерного импульса в мишени



характеристики электронного пучка, ускоренного плазменной полостью

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

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 филаментации лазерного пучка (в случае плазмы околоскритической плотности, т.к. $L < \lambda_p/2$), так и формирования плазменных волн (которые возникают в низкоплотных мишенях).

Спасибо за внимание

Лобок Максим Геннадьевич

mglobok@vniia.ru

31.05.2023

