

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА

О.Е. Вайс, М.Г. Лобок, В.Ю. Быченков

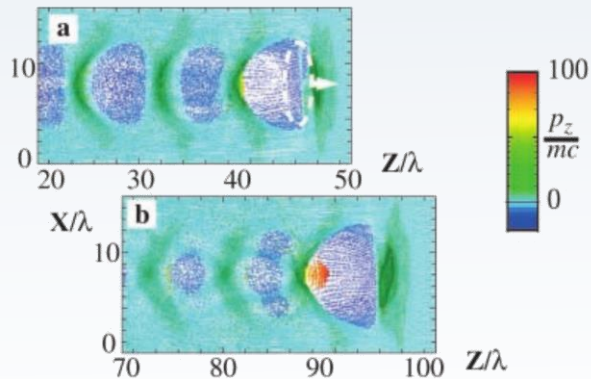
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Семинар «Новые методы ускорения частиц и экстремальные состояния материи»

Лазерно-плазменное ускорение электронов

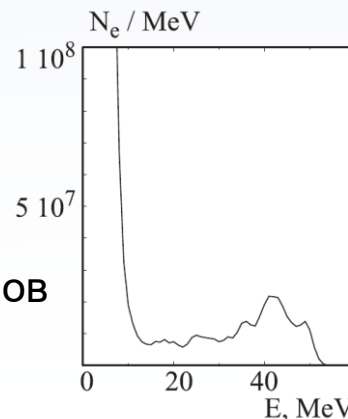
Кильватерное ускорение (LWFA)

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



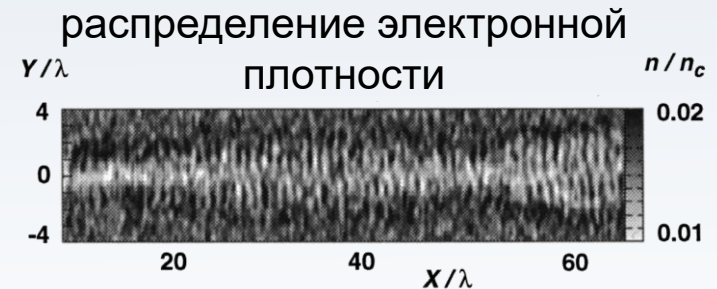
распределение
электронной
плотности

спектр электронов

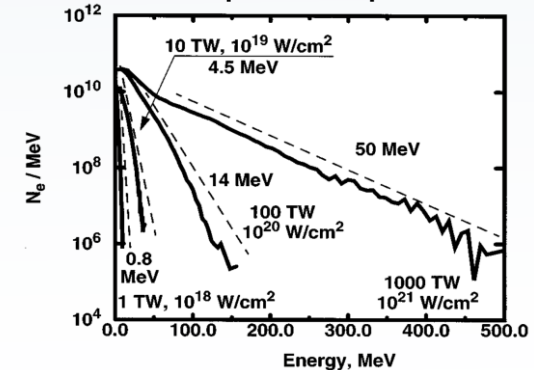


Прямое лазерное ускорение (DLA)

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



спектр электронов



[A. Pukhov, Z.-M. Sheng, and J. Meyer-ter-Venh, Phys. Plasmas **6**, 2847 (1999)]

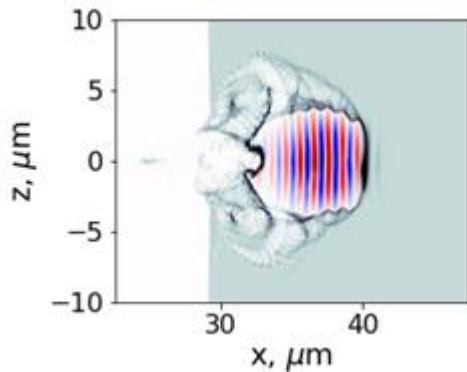
Режим лазерной пули и режим самомодуляции лазерного импульса

$$L = c\tau \geq \lambda_p$$

(околокритическая плотность)

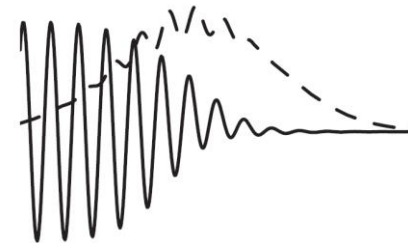
$$c\tau \approx \lambda_p$$

«лазерная пуля»



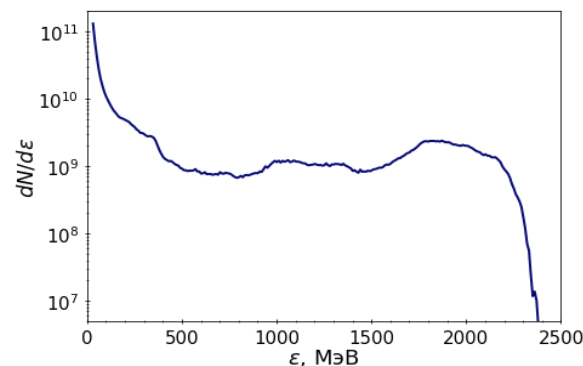
$$c\tau > \lambda_p$$

самомодуляция лазерного импульса



[E. Esarey, C.B. Schroeder, W.P. Leemans, Rev. Mod. Phys. 81, 1229 (2009)]

спектр электронов



Режим релятивистского самозахвата лазерного импульса

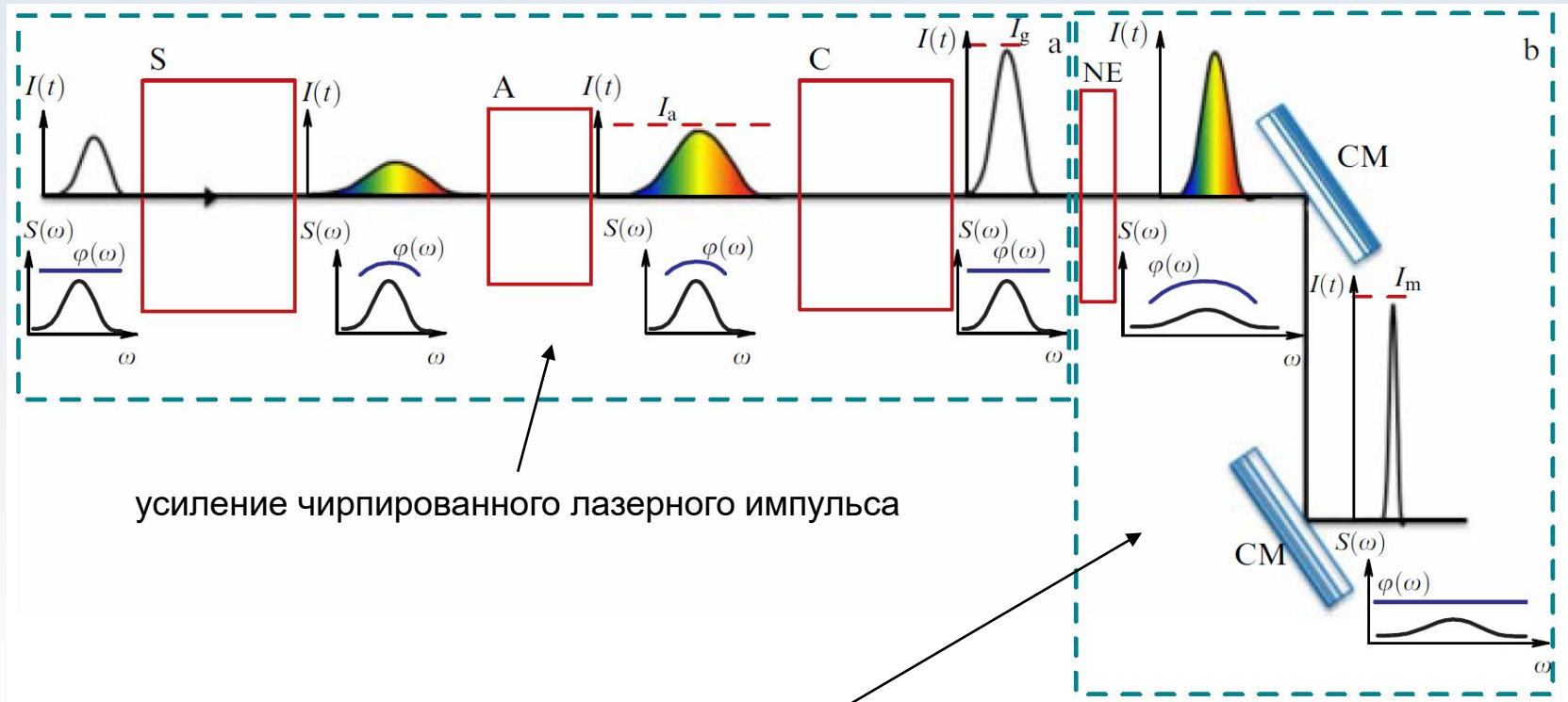
Условие согласования радиуса лазерного пучка, безразмерной амплитуды и плотности мишени [В.Ю. Быченков, В.Ф. Ковалев, Самозахват лазерного света для ультрарелятивистских интенсивностей, Письма в ЖЭТФ 120, 346-353 (2024)]:

$$D \approx \lambda_p \simeq 2.6 \frac{c}{\omega_l} \sqrt{a_0 \frac{n_c}{n_e}}, \quad a_0 \gg 1$$

Аналогичное условие было использовано в работах:

- S. Gordienko and A. Pukhov, Scalings for ultrarelativistic laser plasmas and quasimonoenergetic electrons, Phys. Plasmas 12, 043109 (2005).
- W. Lu, M. Tzoufras, C. Joshi, F. S. Tsung, W. B. Mori, J. Vieira, R. A. Fonseca, and L. O. Silva, Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 061301 (2007).
- K. Poder, J.C. Wood, N.C. Lopes, J.M. Cole, S. Alatabi et al., Multi-GeV Electron Acceleration in Wakefields Strongly Driven by Oversized Laser Spots, Phys. Rev. Lett. 132, 195001 (2024).

Посткомпрессия лазерного импульса



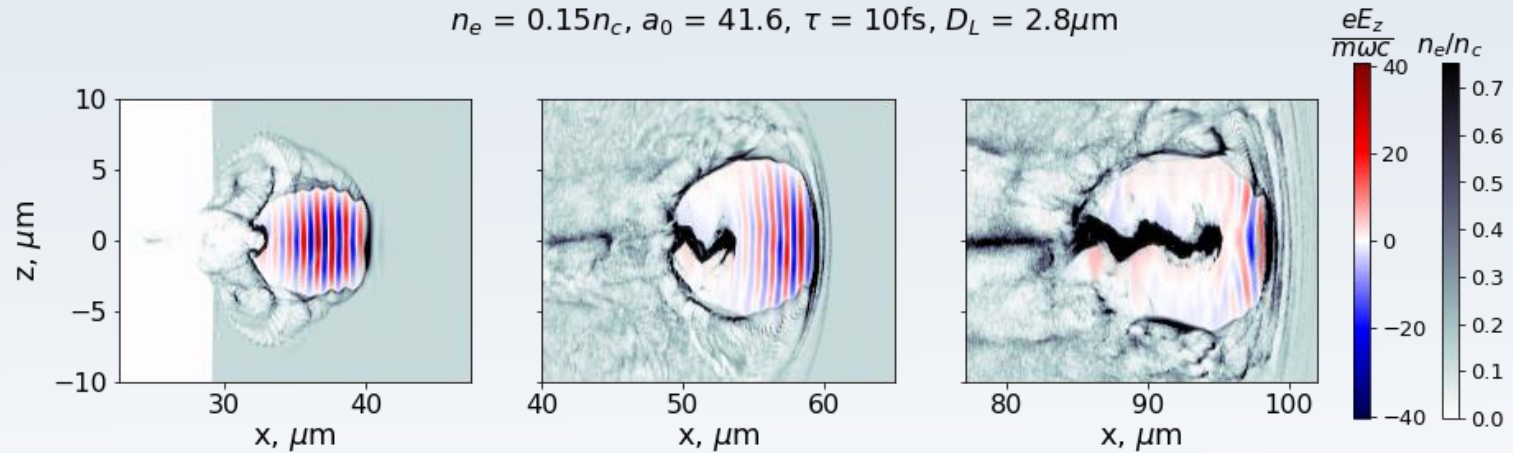
CafCA (“Compression after Compression Approach”): уширение спектра в кристалле с кубической нелинейностью ($n = n_0 + n_2 I$) → chirпированный лазерный импульс с уширенным спектром → сжатие chirпированными зеркалами → спектрально ограниченный короткий импульс

Распространение в режиме лазерной пули

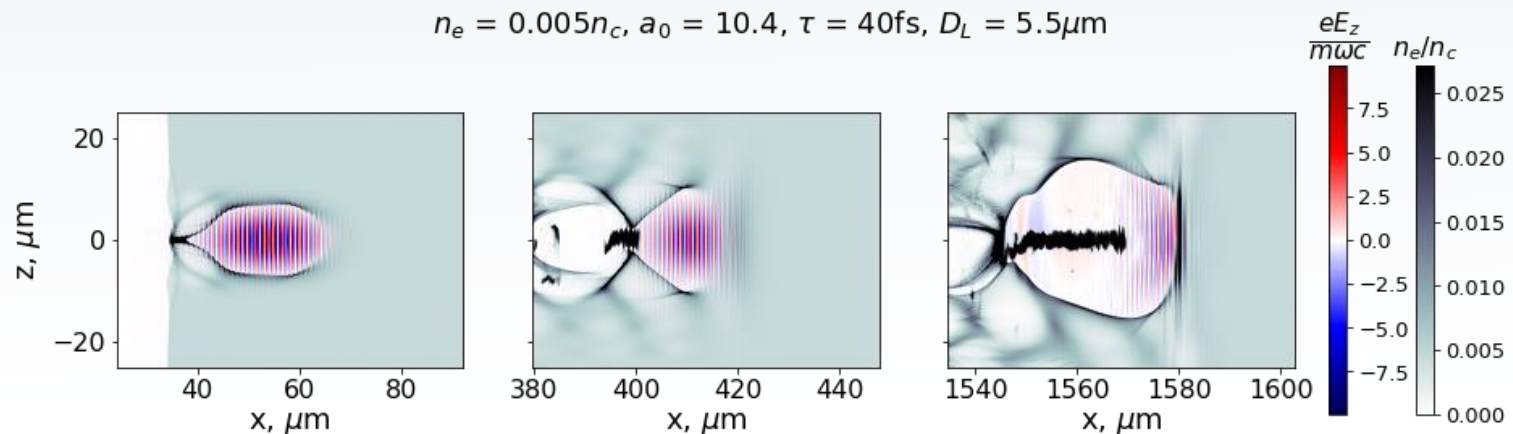
Лазерный импульс: $\lambda_l = 1$ мкм, $W = 2.2$ Дж.

динамика лазерно-плазменной структуры

$$n_e = 0.15n_c, a_0 = 41.6, \tau = 10\text{fs}, D_L = 2.8\mu\text{m}$$



$$n_e = 0.005n_c, a_0 = 10.4, \tau = 40\text{fs}, D_L = 5.5\mu\text{m}$$

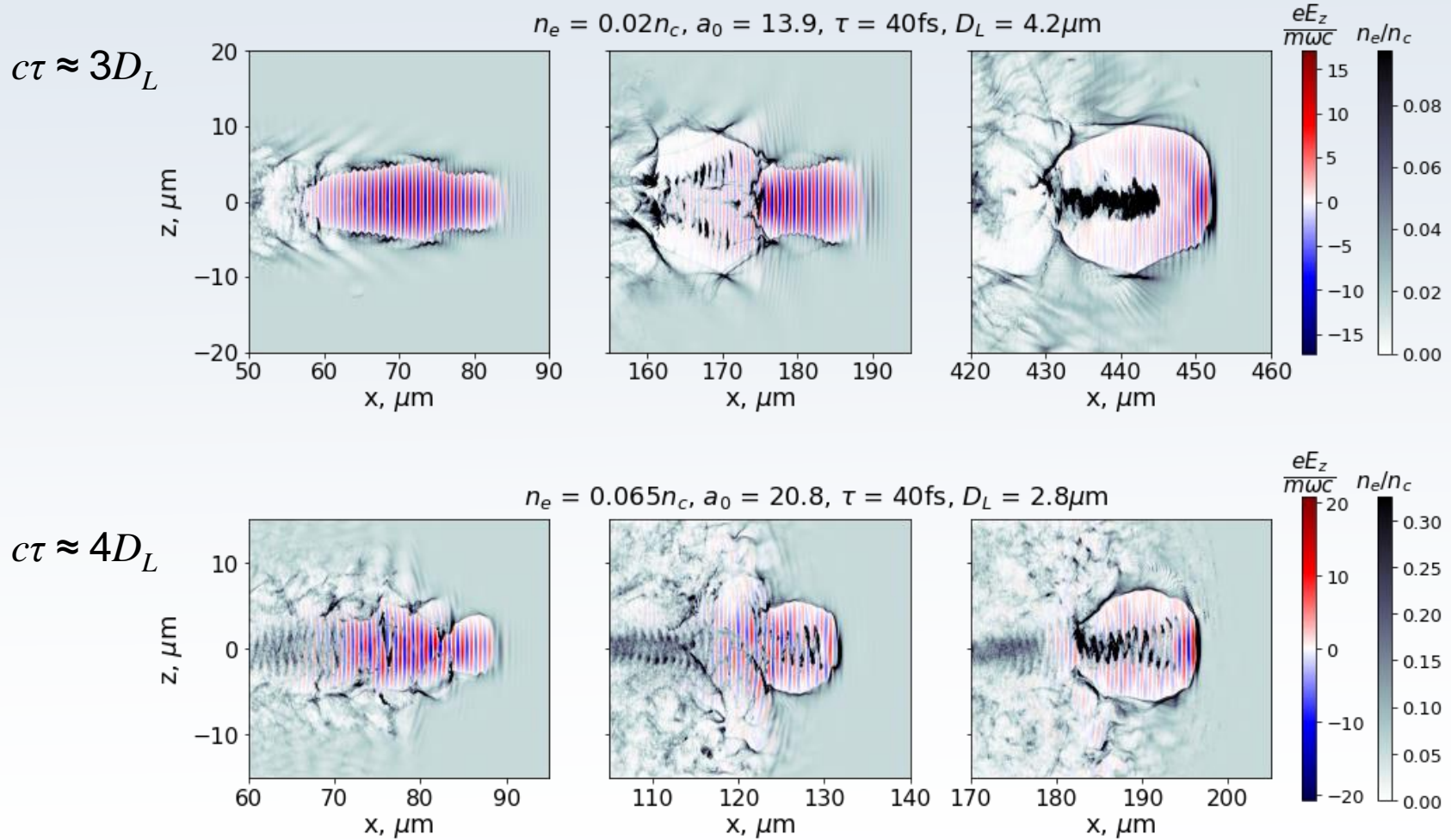


расширился до 8 мкм, т.е. $c\tau \approx 1.5D_L$

Режим самомодуляции лазерного импульса

Лазерный импульс: $\lambda_l = 1$ мкм, $W = 2.2$ Дж.

динамика лазерно-плазменной структуры



Особенности развития режима самомодуляции лазерного импульса

Stimulated processes and self-modulation of a short intense laser pulse in the laser wake-field accelerator*

N. E. Andreev[†] and V. I. Kirsanov

High Energy Density Research Center, Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences,
Izhorskaya 13/19, Moscow 127412, Russia

L. M. Gorbunov

P. N. Lebedev Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Leninskii prospect 53, Moscow 117924,
Russia

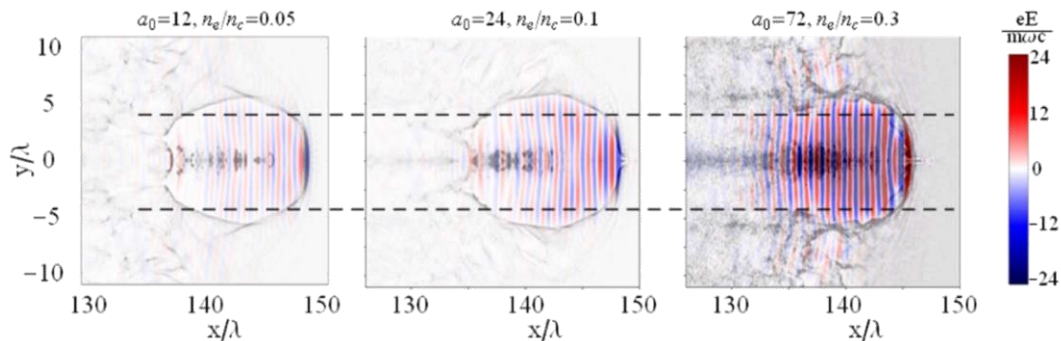
[Phys. Plasmas 2, 2573 (1995)]

IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 24, NO. 2, APRIL 1996

363

Linear Theory of Resonance Self-Modulation of an Intense Laser Pulse in Homogeneous Plasma and Plasma Channels

N. E. Andreev, V. I. Kirsanov, L. M. Gorbunov, and A. S. Sakharov



развитие саомодуляционной
неустойчивости для гауссового
лазерного импульса
при $c\tau > 3\lambda_p$

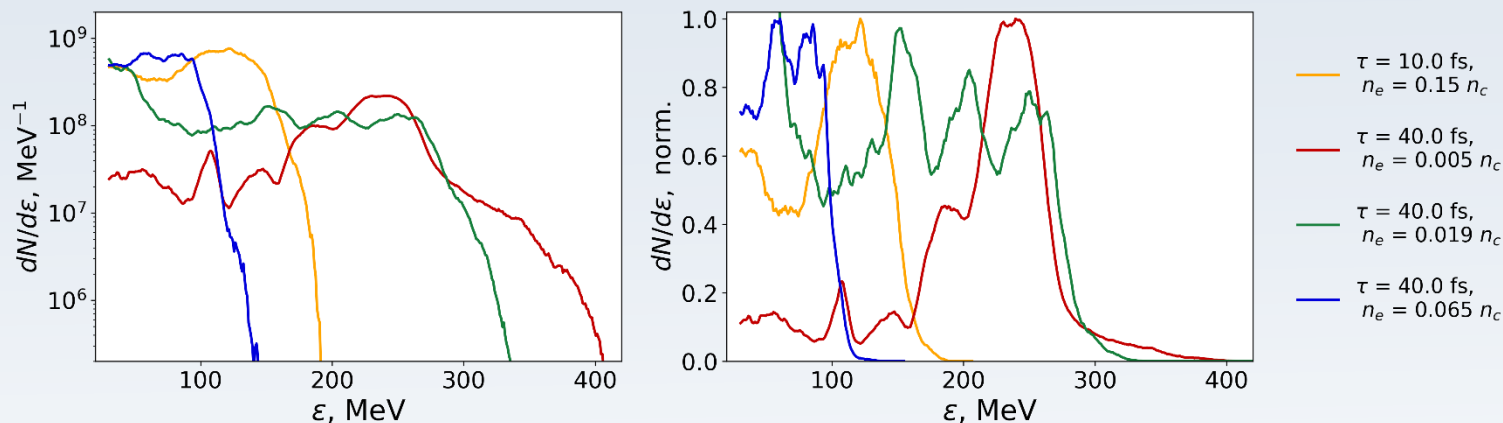
поперечное распространение
энергии при саомодуляции

Для $\lambda_l = 1$ мкм:

1. при $D_F = 3$ мкм
 $\tau < 30$ фс саомодуляция не
наблюдается
2. при $\tau < 10$ фс
саомодуляция наблюдаться
не будет

Сравнение характеристик пучков ускоренных электронов

спектры электронов



P, τ	D_F, MKM	a_0	n_e/n_c	$\langle \mathcal{E} \rangle_{>30\text{MэВ}}, \text{MэВ}$	$Q_{>30\text{MэВ}}, \text{нКл}$	$\eta_{>30\text{MэВ}}$
210 ТВТ, 10 фс	2.8	41.6	0.15	150	10	53%
52 ТВТ, 40 фс	2.8	20.8	0.065	95	6.7	26%
52 ТВТ, 40 фс	4.2	13.9	0.02	140	5.9	35%
52 ТВТ, 40 фс	5.5	10.4	0.005	250	3.1	35%

Теоретические оценки для режима лазерной пули

Лазерная пуля: $c\tau \approx D$

Оценка для полного заряда пучка электронов:

$$Q_0 \sim en_e D^3 \propto a_0 D \propto \sqrt{W_L/\tau}$$

Характерная энергия частиц: eEl_{acc}

Ускоряющее поле: $E \sim (m_e c^2/e) \times (\omega_p/c)^2 D \propto n_e D$

Длина ускорения: $l_{dpl} \propto a_0 c\tau (n_c/n_e)$

Итоговая оценка для энергии: $\varepsilon_e \propto a_0 D\tau \propto (W_L\tau)^{1/2}$

Для $c\tau < D$ скейлинги будут иметь тот же вид после замены τ на D , что согласуется с работой [S. Gordienko and A. Pukhov, Phys. Plasmas 12, 043109 (2005)]

Проверка скейлингов

$$\varepsilon_e \propto (W_{LT})^{1/2}$$

$$\varepsilon_{40} : \varepsilon_{10} \approx 1.7$$

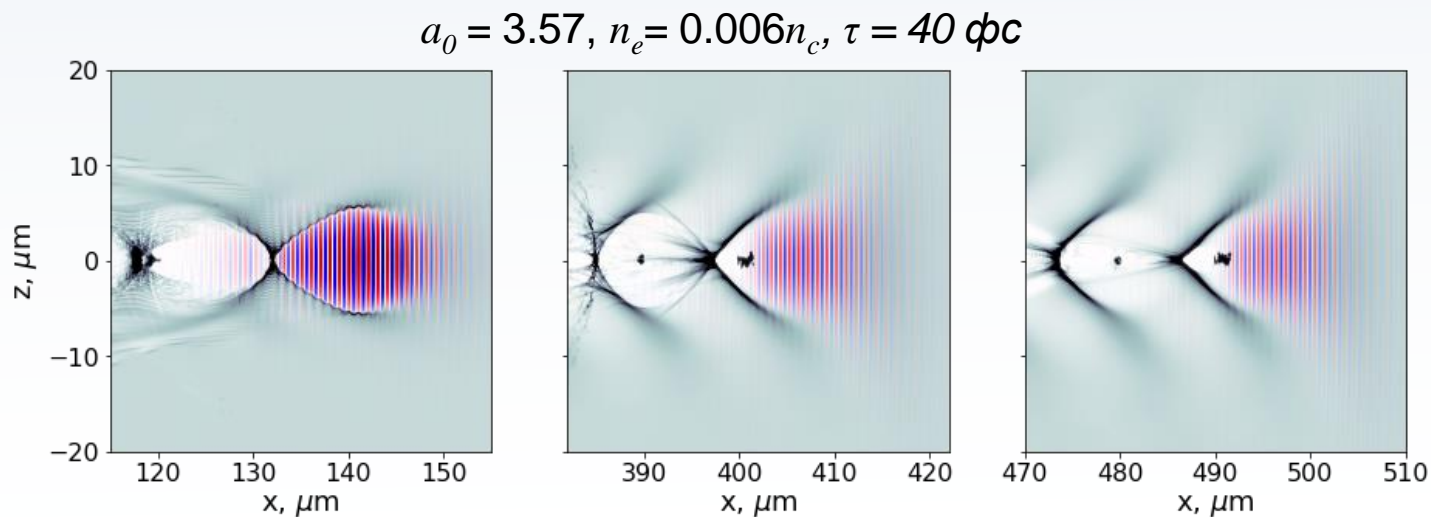
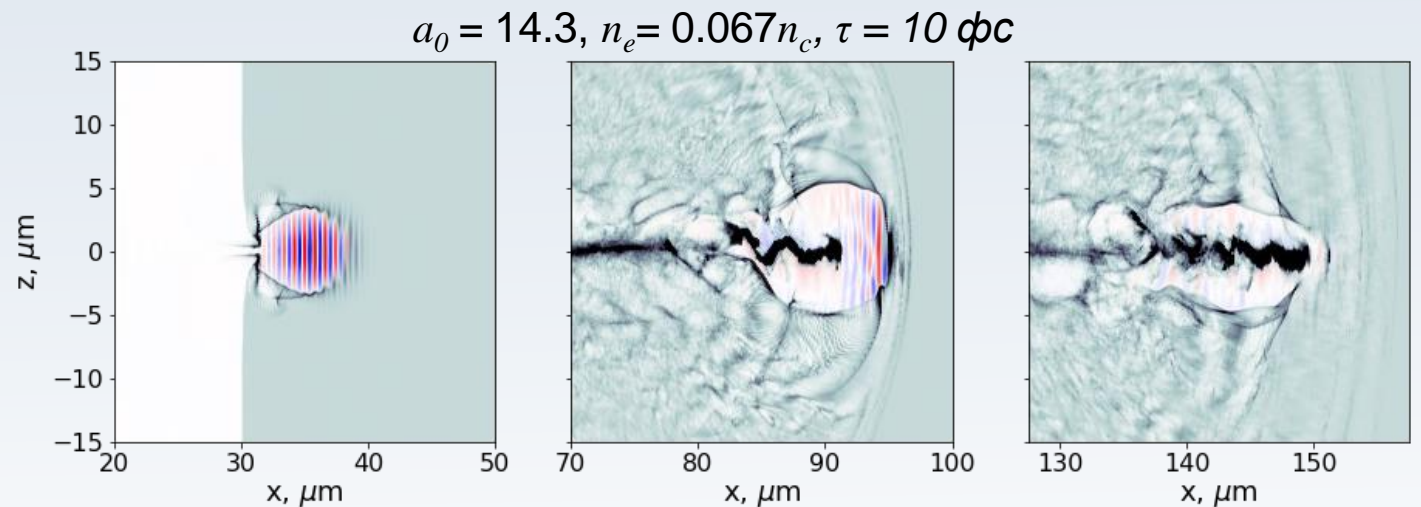
$$Q_0 \propto \sqrt{W_L/\tau}$$

$$Q_{10} : Q_{40} \approx 3.3$$

P, τ	D_F, MKM	a_0	n_e/n_c	$\langle \varepsilon_{>30\text{MэВ}} \rangle,$ МэВ	$Q_{>30\text{MэВ}},$ нКл	$\eta_{>30\text{MэВ}}$
210 ТВТ, 10 фс	2.8	41.6	0.15	150	10	53%
52 ТВТ, 40 фс	5.5	10.4	0.005	250	3.1	35%

Лазерные импульсы с энергией порядка и меньше 1 Дж

Лазерный импульс: $\lambda_l = 0.8$ мкм, $W = 0.41$ Дж.

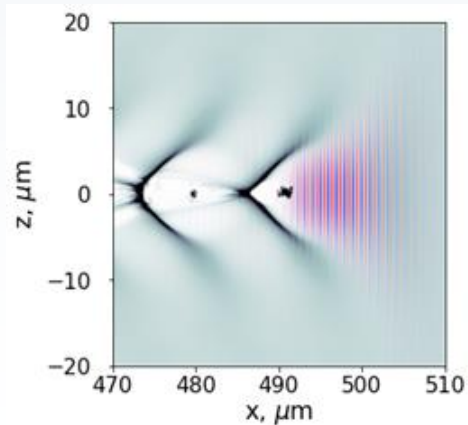


Сравнение результатов для лазерных импульсов различной длительности

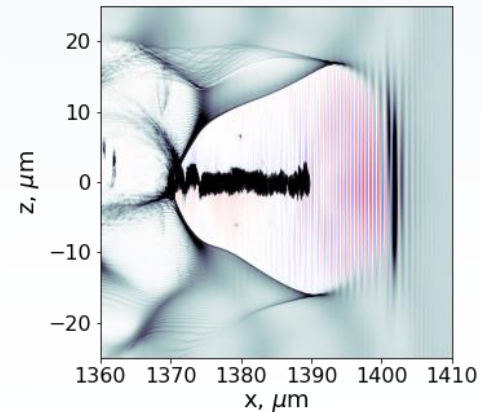
	$\lambda_l = 0.8 \text{ мкм}, W = 0.41 \text{ Дж}$			$\lambda_l = 1 \text{ мкм}, W = 2.2 \text{ Дж}$	
параметры	$\langle \varepsilon_{>20\text{МэВ}} \rangle$, МэВ	$Q_{>20\text{МэВ}}$, нКл	$\eta_{>20\text{МэВ}}$	$Q_{>30\text{МэВ}}$, нКл	$\eta_{>30\text{МэВ}}$
$\tau = 10 \text{ фс},$ $D_F = 2.8 \text{ мкм}$	70	3.1	48%	10	53%
$\tau = 40 \text{ фс},$ $D_F = 2.8 \text{ мкм}$	55	2.0	24%	6.7	26%
$\tau = 40 \text{ фс},$ $D_F = 5.5 \text{ мкм}$	130	0.01	0.2%	3.1	35%

$$a_0 = 3.57, n_e = 0.006n_c$$

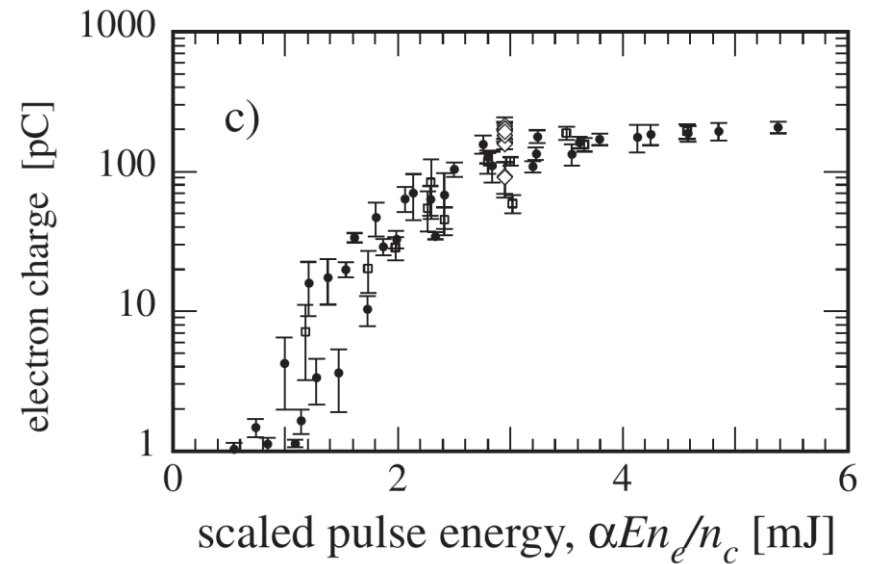
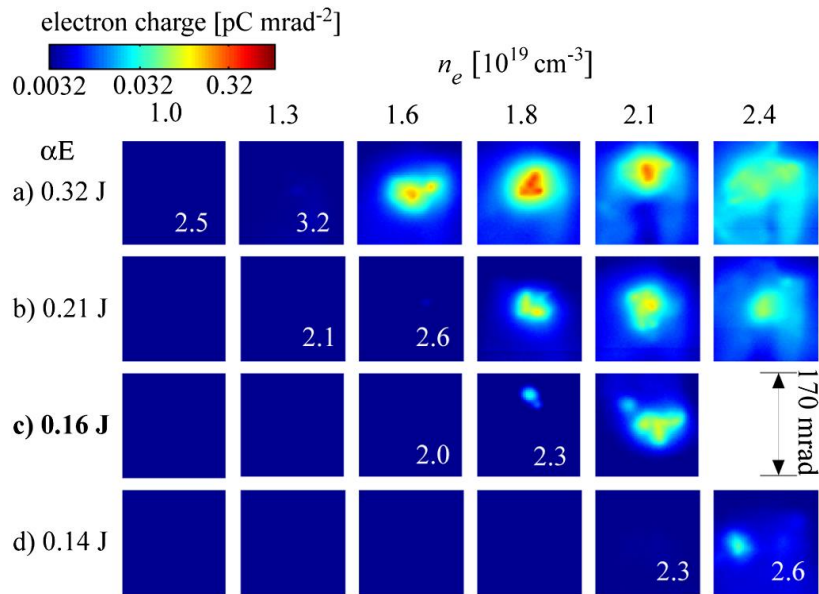
$\tau = 40 \text{ фс}$



$$a_0 = 10.4, n_e = 0.005n_c$$



Самоинжекция электронов

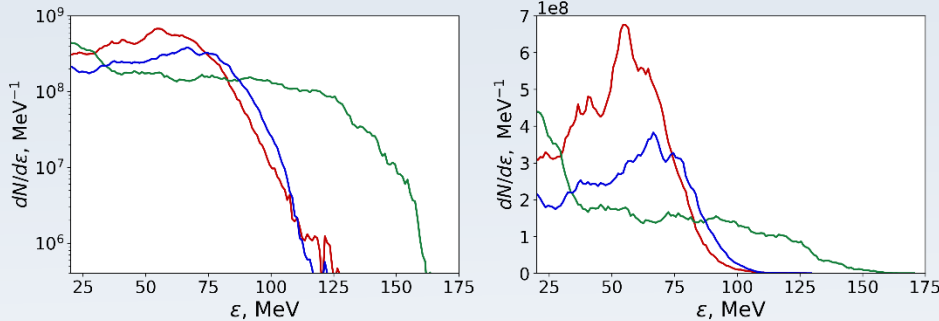


Ниже энергия лазерного импульса → выше порог плотности

Ускорение электронов лазерными импульсами различной энергии

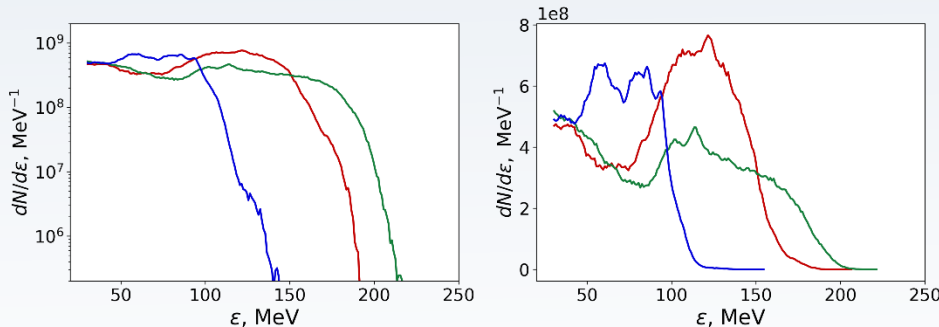
Лазерные импульсы: $\lambda_l = 1$ мкм, $D_F = 2.8$ мкм

$W_L = 0.55$ J



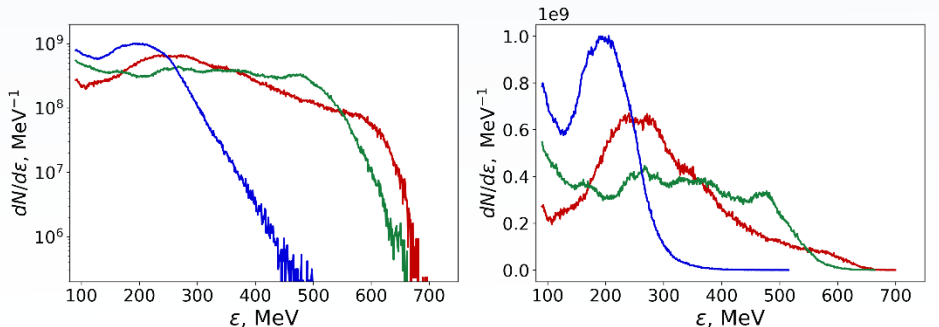
- $\tau = 10.0$ fs, $n_e = 0.09 n_c$
- $\tau = 20.0$ fs, $n_e = 0.046 n_c$
- $\tau = 40.0$ fs, $n_e = 0.032 n_c$

$W_L = 2.2$ J



- $\tau = 10.0$ fs, $n_e = 0.15 n_c$
- $\tau = 20.0$ fs, $n_e = 0.09 n_c$
- $\tau = 40.0$ fs, $n_e = 0.065 n_c$

$W_L = 20$ J



- $\tau = 10.0$ fs, $n_e = 0.52 n_c$
- $\tau = 20.0$ fs, $n_e = 0.33 n_c$
- $\tau = 40.0$ fs, $n_e = 0.23 n_c$

$\tau \phi c (a_0)$	$\langle \epsilon \rangle$, МэВ	Q , нКл	η
10 (20.8)	74	4.7	50%
20 (14.7)	70	3.4	40%
40 (10.3)	62	3.2	31%
10 (41.6)	150	10	54%
20 (29.4)	120	8.7	43%
40 (20.8)	90	6.7	26%
10 (125)	415	29	45%
20 (88.2)	310	27	39%
40 (62.4)	200	29	27%

Проверка скейлингов

$\lambda_l = 1$ мкм, $D_F = 2.8$ мкм, $\tau = 10$ фс

W , Дж (a_0)	$\langle \varepsilon \rangle$, МэВ	Q , нКл
0.55 (20.8)	74	4.7
2.2 (41.6)	150	10
20 (125)	415	29

$$W_1 : W_2 : W_3 \approx 1 : 2^2 : 6^2$$

$$\varepsilon_e \propto (W_L \tau)^{1/2}$$
$$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 : \varepsilon_3 \approx 1 : 2 : 5.5$$

$$Q_0 \propto \sqrt{W_L / \tau}$$
$$Q_1 : Q_2 : Q_3 \approx 1 : 2 : 6$$

Заключение

Результаты были представлены в работах:

Compression of high-power laser pulse leads to increase of electron acceleration efficiency

O. E. Vais,^{1,2} M. G. Lobok,^{1,2} and V. Yu. Bychenkov^{1,2}

¹*P. N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Science,
Leninskii Prospect 53, Moscow 119991, Russia*

²*Center for Fundamental and Applied Research,
Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow 127055, Russia*

Propagation of ultrarelativistically intense laser pulse in a self-trapping mode in a near critical density plasma makes it possible to produce electron bunches of extreme parameters appropriate for different state of art applications. Based on the 3D PIC simulations, it has been demonstrated how the best efficiency of electron acceleration in terms of the total charge of high-energy electrons and laser-to-electrons conversion rate can be achieved. For given laser pulse energy the universal way is a proper matching of laser hot spot size and electron plasma density to the laser pulse duration. The recommendation to achieve the highest yield of high-energy electrons is to compress laser pulse as much as possible. As example, compression of the few tens fs pulse to the ~ 10 fs pulse leads to generation of the high-energy electron bunch with the highest total charge to exhibit conversion efficiency exceeding 50% for the Joule-level laser pulse energies.

arxiv:2409.02671

- O. E. Vais, M. G. Lobok, A.A. Soloviev, S.Yu. Mironov, E. A. Khazanov, V. Yu. Bychenkov, *Jetp. Lett.* 118, 875-880 (2023).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!