

Сравнительный анализ лазерного ускорения электронов в режиме релятивистского самозахватного распространения : “лазерная пуля” или “пузырь”?



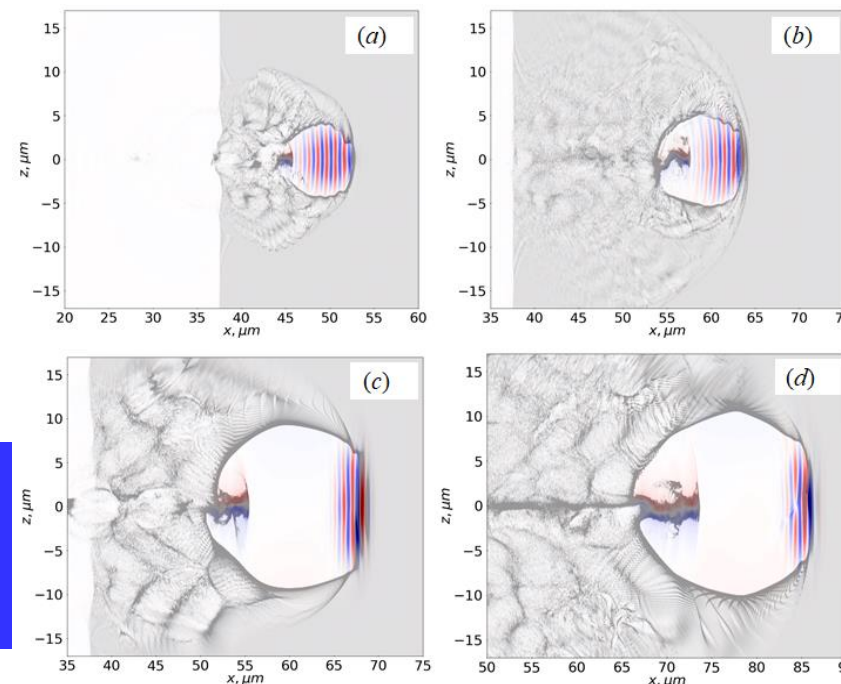
P.N. Lebedev Physical
Institute of the Russian
Academy of Science

Бочкарев С.Г.^{1,2}, Кастильо А.^{1,3}, Лобок М.Г.^{1,2}, Быченков В.Ю.^{1,2}

¹Lebedev Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

²Center for Fundamental and Applied Research,
Dukhov Research Institute of Automatics ROSATOM,
Moscow, Russia

³Russian University "Peoples Friendship", Mikluho-Maklaya 6,
Moscow, 115569



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

План доклада

- ❑ Релятивистский самозахват лазерного импульса (РСЗ) для получения высоко-зарядных электронных пучков
- ❑ Результаты 3D PIC моделирования для распространения в прозрачной плазме лазерного импульса в режиме РСЗ для случая лазерной пули и пузыря
- ❑ Заключение: результаты и практическое применение

Мотивация: потребность в высокозарядных лазерно-ускоренных электронных пучках нКл уровня

Требуется повысить эффективность взаимодействия для радиационно-ядерных приложений, компактный ускоритель лазерно-плазменный ускоритель

Кильватерное ускорение

Tajima T. and Dawson J. M. Phys. Rev. Lett. **43** 267 (1979)

3D Нелинейный режим с образованием солитона

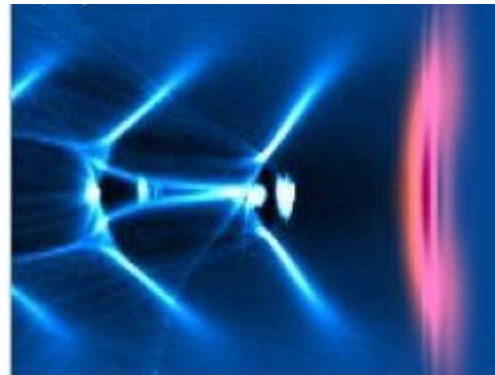
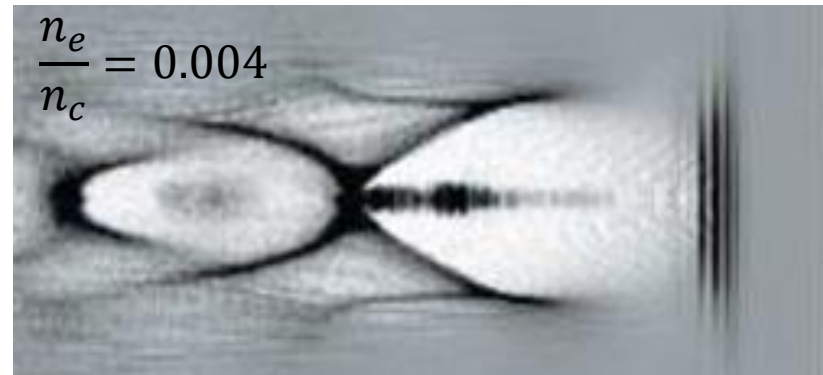
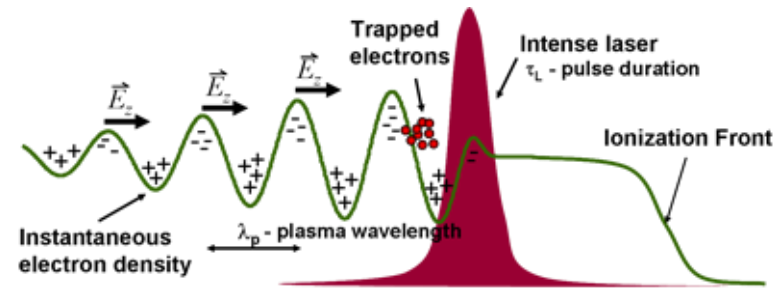
Pukhov A. and Meyer-ter-Vehn J., Appl. Phys. B:

Lasers Opt. **74** 355 (2002)

W. Lu et al., Phys. Rev. STAB
10, 061301 (2007)

I. Yu. Kostyukov and A. M. Pukhov, Phys.-Usp. 58, 81 (2015).

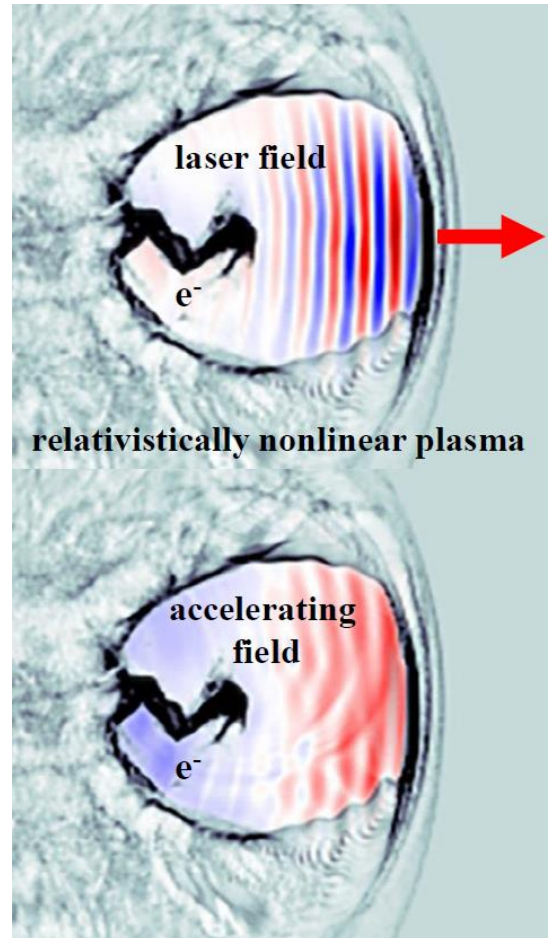
$$E_{mono} \approx 0.65 m_e c^2 \sqrt{\frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{rel}} \frac{c\tau}{\lambda}}$$



Возможно получение сгустков электронов с энергиями (до 10ГэВ на 10 см, 150 Дж, 150 фс),

Matter Radiat. Extremes 9, 014001 (2024)
однако типично заряд сгустка суб-нКл уровня

Солитонная лазерно-плазменная структура. Настольный ускоритель



“Настольный” ускоритель:

формируется каверна заполненная лазерным импульсом, и распространяющаяся с его групповой скоростью

Цель: Энергия: сотни-сотни МэВ

Полный заряд: ~ 10 нКл, **эффективность преобразования $\sim 50\%$**

Для практических приложений требуется сверхкороткий (6-30 фс) лазерный импульс,

при этом длина ускорения – сотни мкм,

для лазера с энергией 1 Дж можно получить электроны с энергией 60–250 МэВ, зарядом ~ 10 нКл

V.Yu.Bychenkov, A.J.Castillo, S.G.Bochkarev, M.G.Lobok,
JETP Lett. **121**, 512 (2025).

Релятивистский самозахват (РСЗ) как сильно-нелинейный режим волноводного распространения импульса для ускорения электронов (требуется согласование параметров лазера и среды)

$$a_0 > 1$$

(сильно-нелинейный 3D режим) требуется

достичь баланса дифракционной

расходимости и релятивистской

нелинейности (при учете влияния

релятивистской массы электрона и

электронной кавитации)

M. G. Lobok, A. V. Brantov, and V. Yu. Bychenkov, Phys. Plasmas 26, 123107 (2019)

V. Yu. Bychenkov and V. F. Kovalev, JETP Lett. 120, 334 (2024);

Zh. Teor. Exp. Fiz. 167, 749 (2025)

аналогия при $a_0 \ll 1$, $a_0 = eE_0/(m_e c \omega)$

отправная точка –самофокусировка, $P > P_c$

G.A.Askar'yan, Sov. Phys. JETP 15 1088 (1962)

самозахват – режим нелинейного волновода в среде с кубической нелинейностью, описывается НУШ

V. I. Talanov, Izv. Vuz. 7, 564 (1964)

R. Y. Chiao, E. Garmire, C. Townes, Phys. Rev. Lett. 13, 479 (1964)

S.A. Akhmanov, A.P. Sukhorukov, R.V. Khokhlov, Sov. Phys. JETP 23 1025 (1966)

Два режима РСЗ: пузырь и лазерная пуля

Модерирование демонстрирует подобие

$$D \sim \frac{c}{\omega} \sqrt{a_0 n_c / n_e} \sim \lambda_p / 2$$

$D \sim c\tau \rightarrow$ **лазерная пуля**

Условие устойчивости (модуляционно стабильное распространение)

$D \gg c\tau \rightarrow$ **пузырь (бэбл)**

Условие самозахватного распространения ($a_0 \gg 1$) *

$$\begin{aligned} c\tau &\lesssim D, c\tau \lesssim \lambda_p, \\ \lambda_p &= 2\pi c\sqrt{\gamma}/\omega_p, \\ \sqrt{n_e/n_c} &\leq 2.6\sqrt{a_0}/\omega\tau \end{aligned}$$

$$D = \alpha(c/\omega_p) \sqrt{a_0} \sim I_L^{1/4} n_e^{-1/2}, \quad a_0 \approx 0.855 \sqrt{I_{18} \lambda_{1\mu}^2}$$

$\alpha \approx 3.16$ (циркулярная)

$\alpha \approx 2.66$ (линейная поляризация)

$D \approx 1.49 (n_c/n_e)^{1/3} P_L^{1/6}$, где P_L в ТВТ

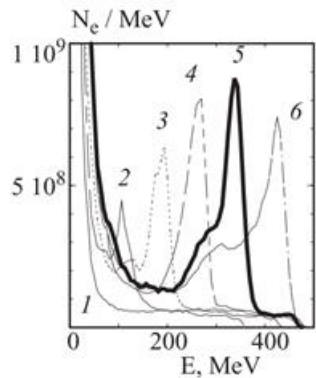
Условие самозахвата



аттрактор (солитон)

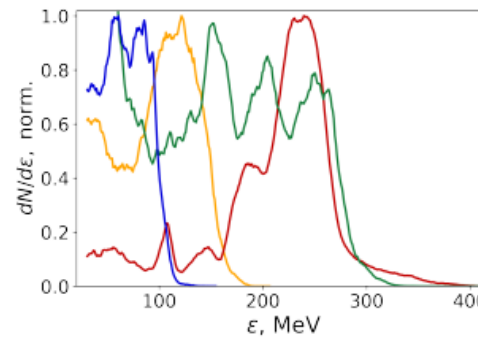
*Bychenkov V.Yu., Kovalev V.F., JETPh Letters, 120(5) 334 (2024); Phys. Rev. E 110, 065202E (2024)

Сопоставление режимов РСЗ для фс импульса типичной длительности ~30 фс



Pukhov A. and Meyer-ter-Vehn
J., Appl. Phys. B: Lasers Opt. **74** 355 (2002)

$D \gg c\tau \rightarrow$ **пузырь (бабл)**
12-J, 33-fs,
conversion efficiency
to high energy electrons 15%-20%



O. E. Vais, M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov, Phys. Rev. E **110**, 065202E (2024)

$\sim c\tau \rightarrow$ **лазерная пуля**
2.2J, 40-fs
conversion efficiency
to high energy electrons
>30%

Оценки максимального коэффициента конверсии

$$E_x \sim e n_e D, \quad l_{dpl} \sim a_0 c \tau n_c / n_e$$

энергия электрона

$$\epsilon_e \sim e E_x l_{dpl} \sim D a_0 c \tau m_e \omega^2, \quad N_e \leq n_e D^3$$

энергия пучка ускоренных электронов

$$W_e \sim N_e \epsilon_e \leq n_e D^4 a_0 c \tau m_e \omega^2 \sim W_L$$

l_{dpl} — длина ускорения определяется
длиной истощения лазерного импульса ($l_{dpl} \sim l_{dph}$)

$$l_{dph} \approx a_0 D n_c / n_e$$

conversion efficiency

$$\eta \sim 1$$

Однако моделирование показывает, что сжатие импульса повышает коэффициент конверсии!

3D PIC моделирование

Лазер-плазменные параметры

Параметры расчетной области

$$\lambda = 1 \text{ мкм } \tau_L = 6 - 20 \text{ фс (FWHM)}$$

$$I_L = (10^{19} - 5 \times 10^{21}) \text{ Вт/см}^2$$

линейно-поляризованный импульс

$$a_0 = eE_L / m_e c \omega = 4 - 74$$

$$D_0 = (2 - 20) \lambda$$

$$W_L = 2.2 \text{ Дж}$$

мишень

гелий (He),

плотность $n_e = 0.005 - 0.2 n_c$

бегущее окно

Размеры расчетной области:

$100\lambda \times 80\lambda \times 80\lambda$:

разрешение: $\frac{\lambda}{40} \times \frac{\lambda}{15} \times \frac{\lambda}{15}$

время ускорения $\approx 300 - 1500$ фс

длина ускорения $50 - 2000 \lambda$

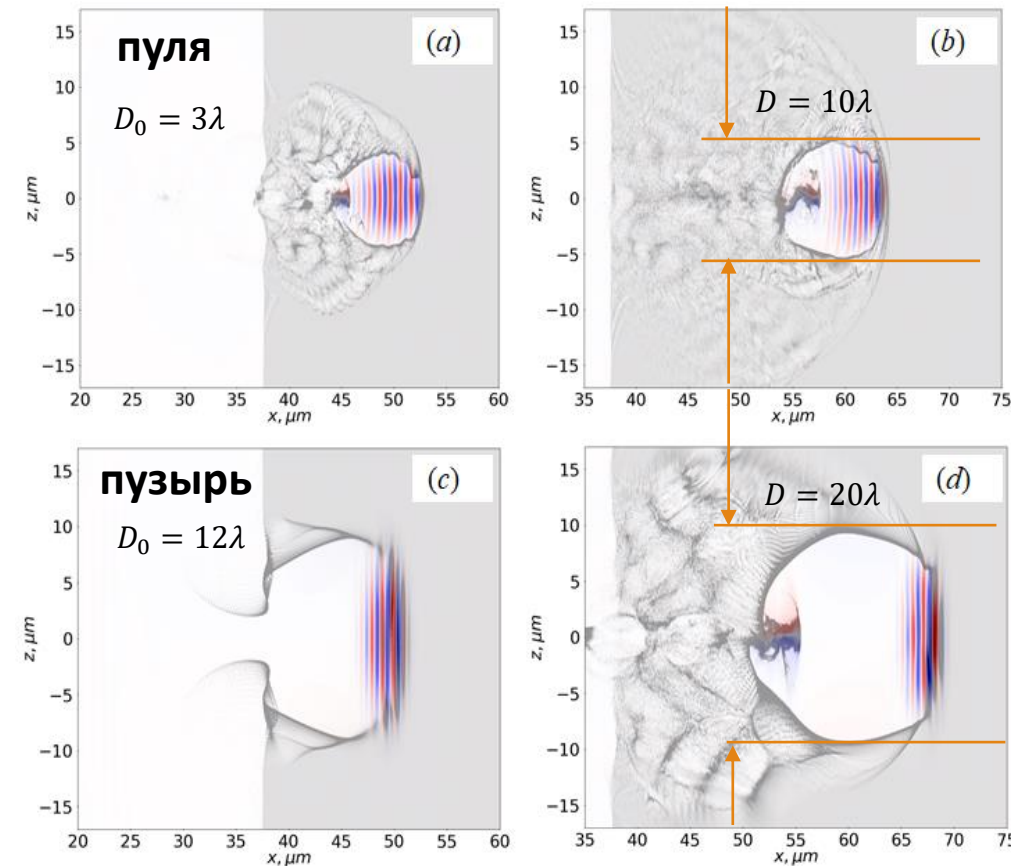
граничные условия

- в продольном направлении- поглощающие
- поперек - периодические

1 расчет- 30 часов, 720 ядер

Результаты 3D PIC моделирования: сравнение

Распределение электрического поля и плотности для $\tau = 10\text{ фс}$, 2Дж



Лазерный импульс фокусируется на резкую границу мишени

$$n_e = 0.01 n_c, a_0 = 42$$

$$D = \alpha(c/\omega_p) \sqrt{a_0}$$

$$D_0 < D$$

$$n_e = 0.15 n_c, a_0 = 25$$

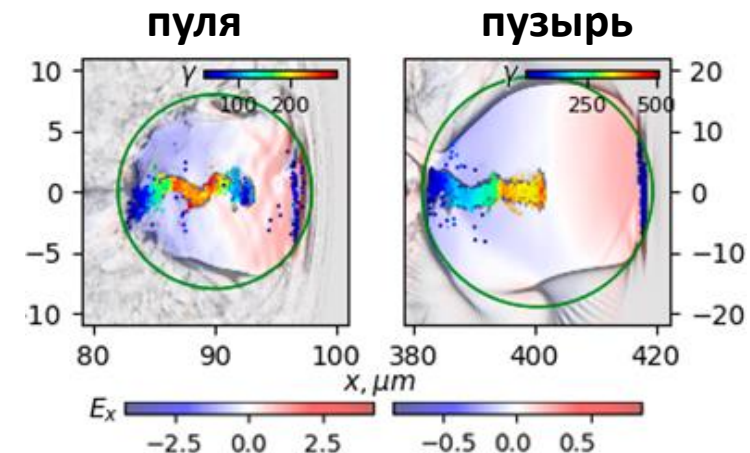
определялся заряд электронов
захваченных в каверну с энергией
свыше 30 МэВ,
длина ускорения $\approx l_{dpl}$

**Впрыск электронов в каверну
за счет самоинжекции**

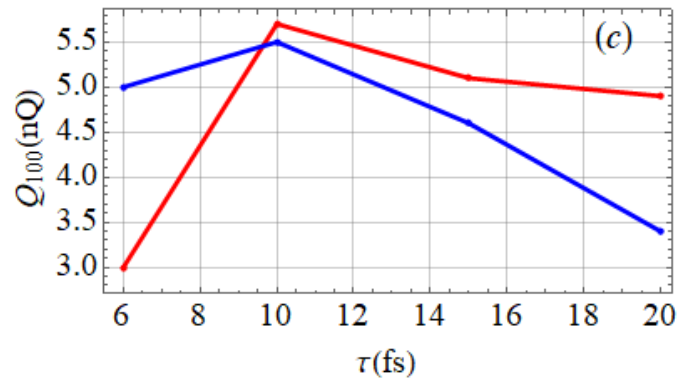
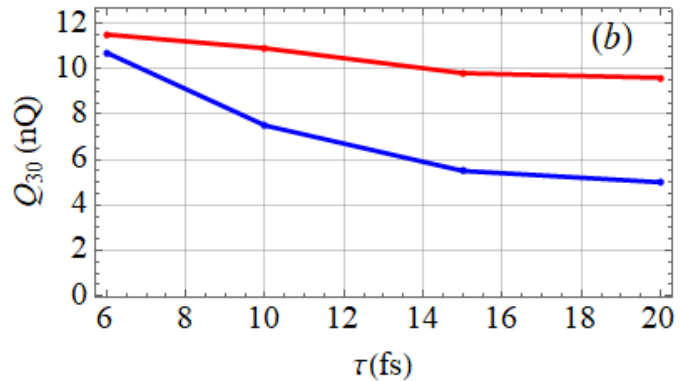
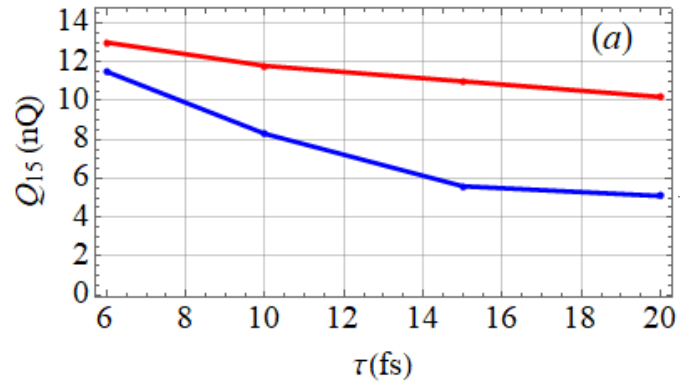
S. P. D. Mangles et al.,
Phys Rev STAB 15 011302 15,
011302 (2012)

I. Kostykov, *New J. Phys.* **12** 045009 (2010)

A.G.R. Thomas, *Phys. Plasmas*, **17**, 056708 (2010).



Характеристики ускоренных электронов (заряд)



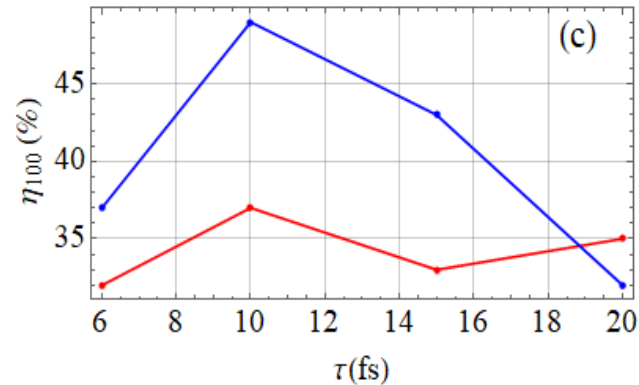
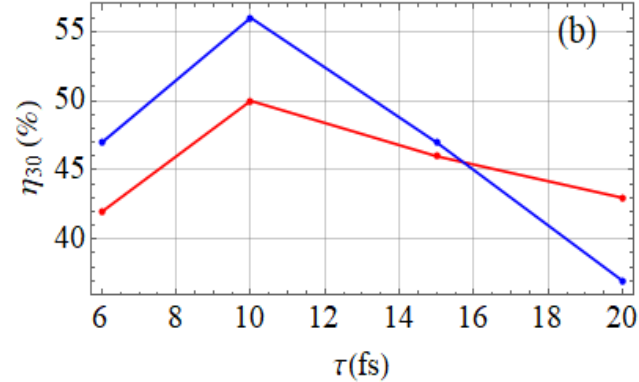
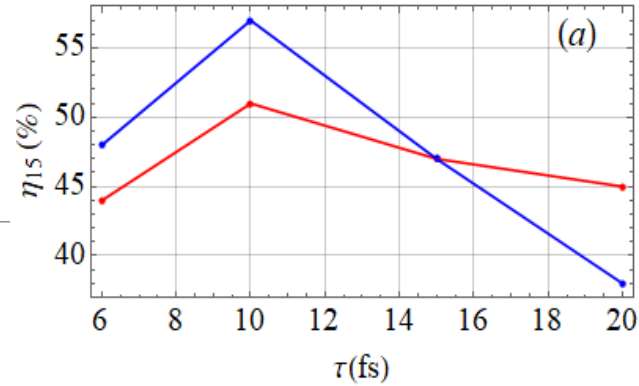
$$Q_{\epsilon_0} = \int_{\epsilon_0}^{\infty} d\epsilon \, dN_e/d\epsilon / W_L$$

Суммарный заряд ускоренных электронов в каверне с энергией выше 15(a), 30(b) и 100 МэВ (c) для двух режимов РСЗ, лазерная пуля (красный) и пузырь (синий), в зависимости от длительности импульса

Максимальный заряд электронного сгустка достигается в случае лазерной пули!

Стохастическая инжекция электронов в полость для случая лазерной пули с комбинированным лазерным и продольным полем приводит к уменьшению потерь инжектированных электронов в полость и увеличению общего заряда

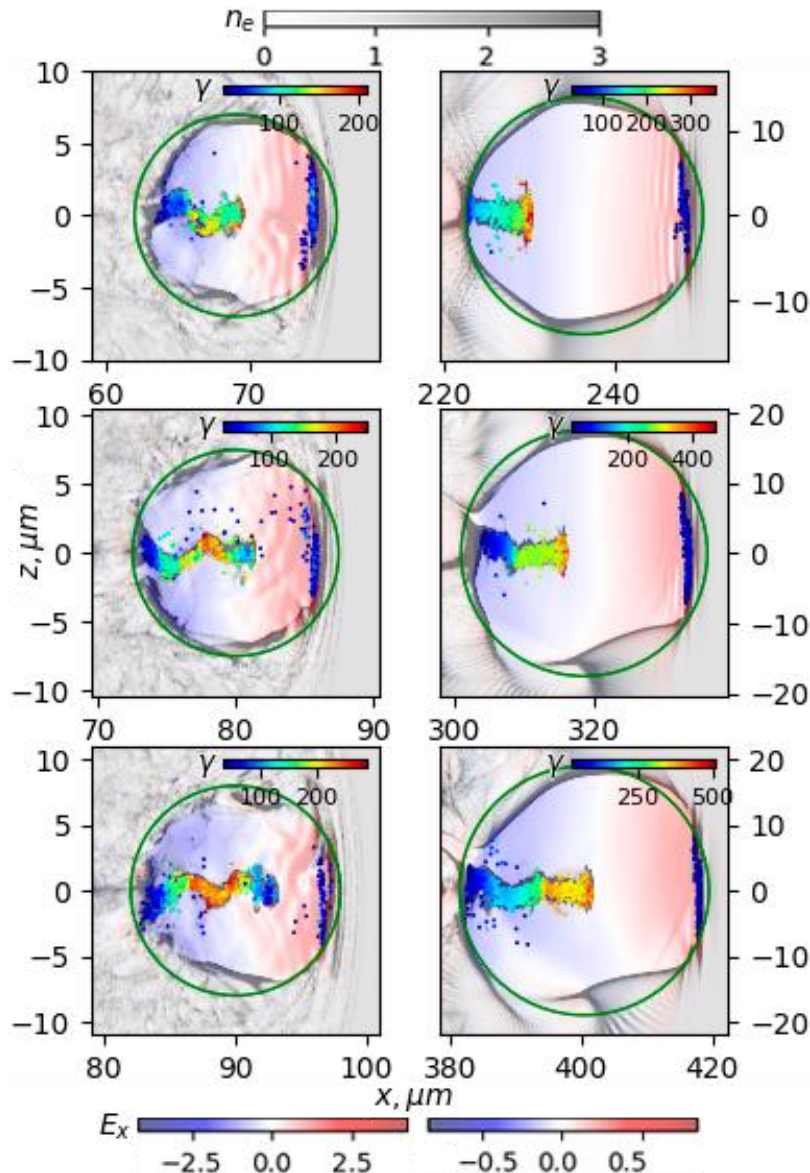
Характеристики ускоренных электронов (конверсия)



$$\eta(\epsilon_0) = \int_{\epsilon_0}^{\infty} d\epsilon \epsilon dN_e/d\epsilon / W_L$$

Коэффициент преобразования энергии лазера в лазерно-электроны с энергией более 15 (a), 30 (b) и 100 МэВ (c) для двух режимов RST: лазерная пуля (**красный**) и пузырь (**синий**), в зависимости от длительности импульса

Два режима РСЗ: динамика пузыря и лазерной пули



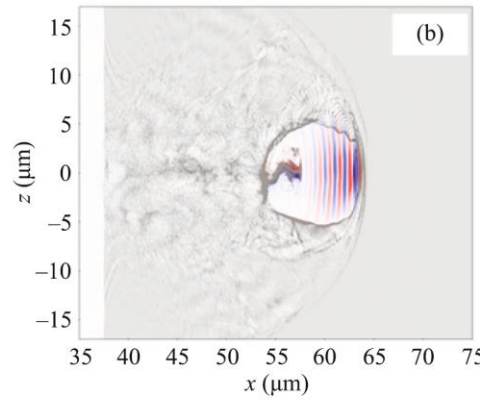
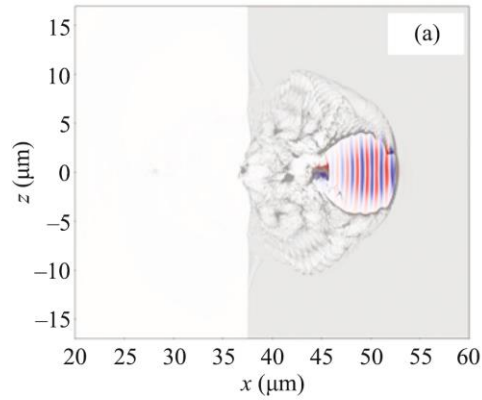
Лазерная пуля: каверна достигает максимального электронного заряда, когда электроны уже находятся в тормозящее электрическое поле

Пузырь: каверна достигает максимального электронного заряда, когда электроны еще не попадают в тормозящее электрическое поле аналогично ускорению в кильватерном поле

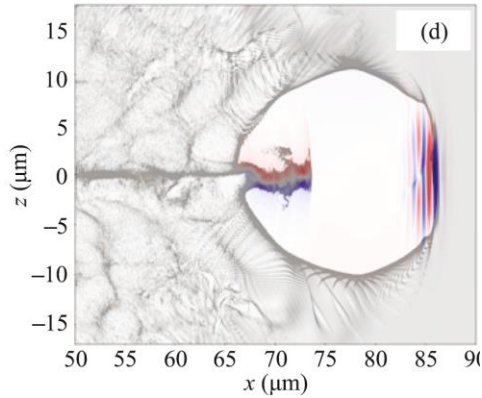
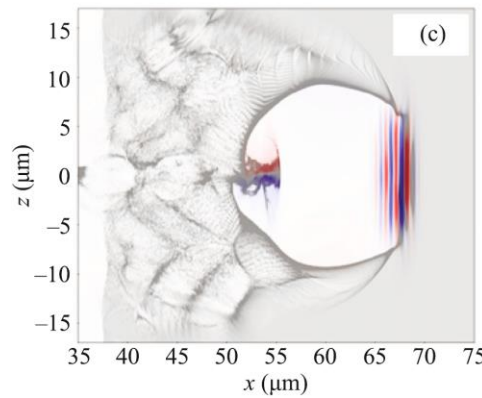
$$l_{acc} \approx l_{dpl} \leq l_{dph}$$

$$l_{dpl} \propto a_0 n_c c \tau / n_e, l_{dph} \propto$$

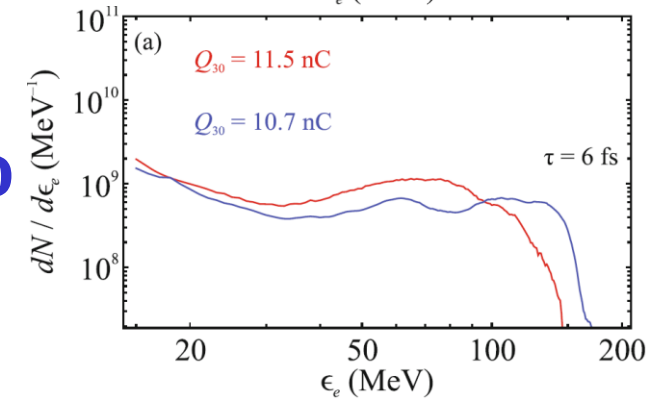
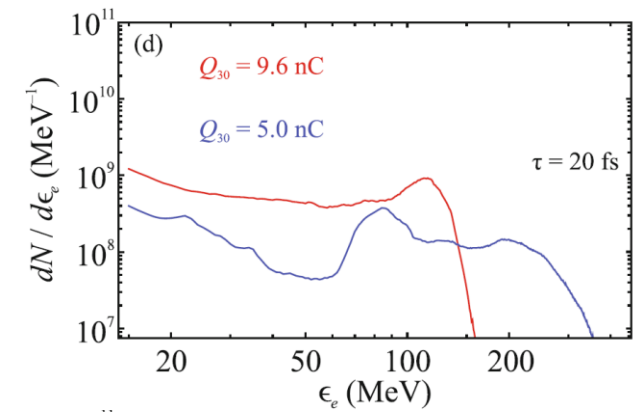
Спектры : сравнение лазерной пули и пузыря



$$c\tau \approx D$$



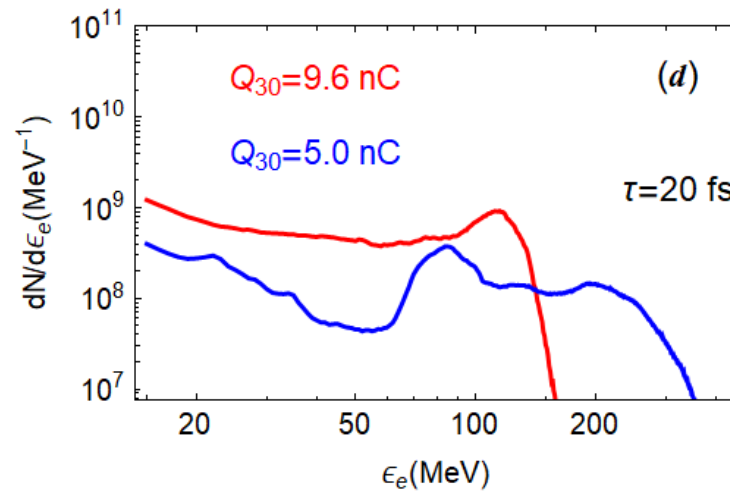
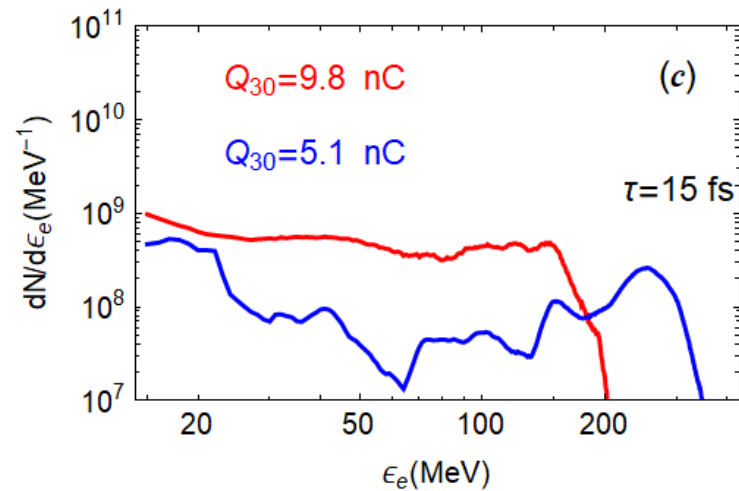
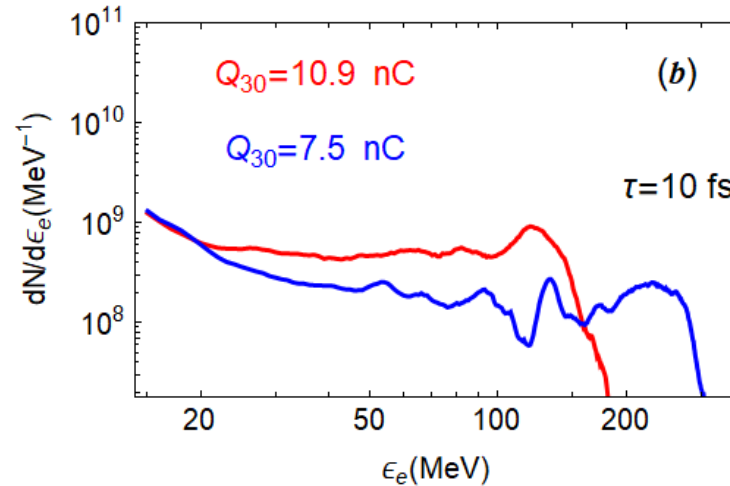
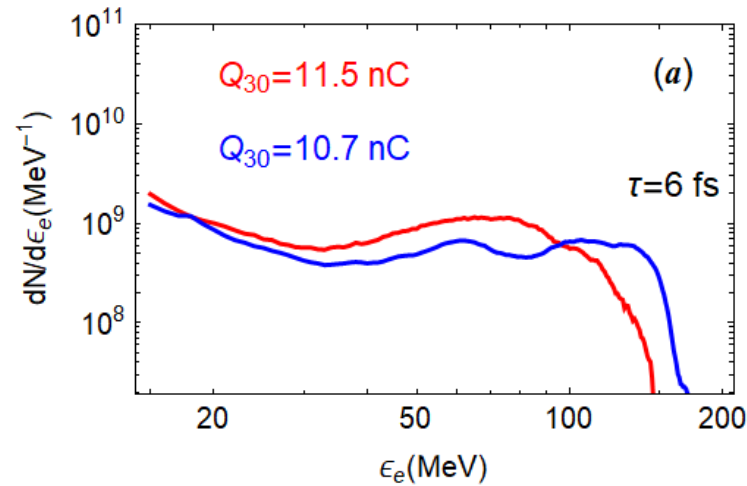
$$c\tau \ll D$$



Укороченный импульс, примерно одинаковая эффективность

Стандартный фс импульс, лазерная пуля более эффективна

Энергетические спектры : все случаи



Спектры электронов (a)–(г)

в расчетной области

с энергией выше 15 МэВ

для двух мод РСЗ,

лазерная пуля (**красный**) и

пузырек (**синий**), в

зависимости от

длительности импульса

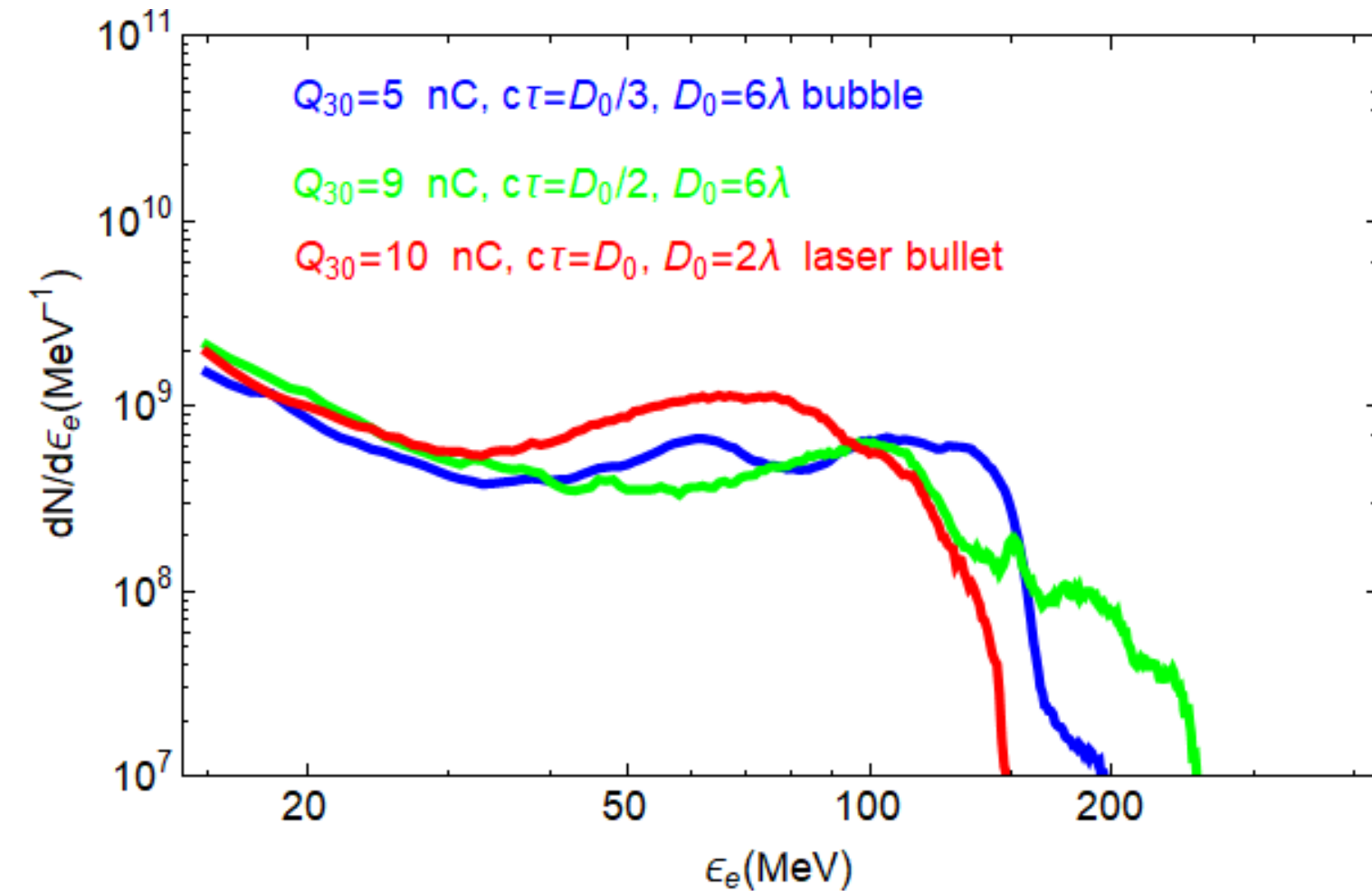
Широкое плато для лазерной пули

обусловлено стохастической

инжекцией в комбинированном

лазерном и плазменном поле

Устойчивость режима самозахвата (промежуточный случай)



Спектры энергии электронов для

пули, пузыря и промежуточного
случая

Заряд высокоэнергетического
электронного сгустка монотонно
изменяется между максимальным
(лазерная пуля) и минимальным
(пузырь) значениями.

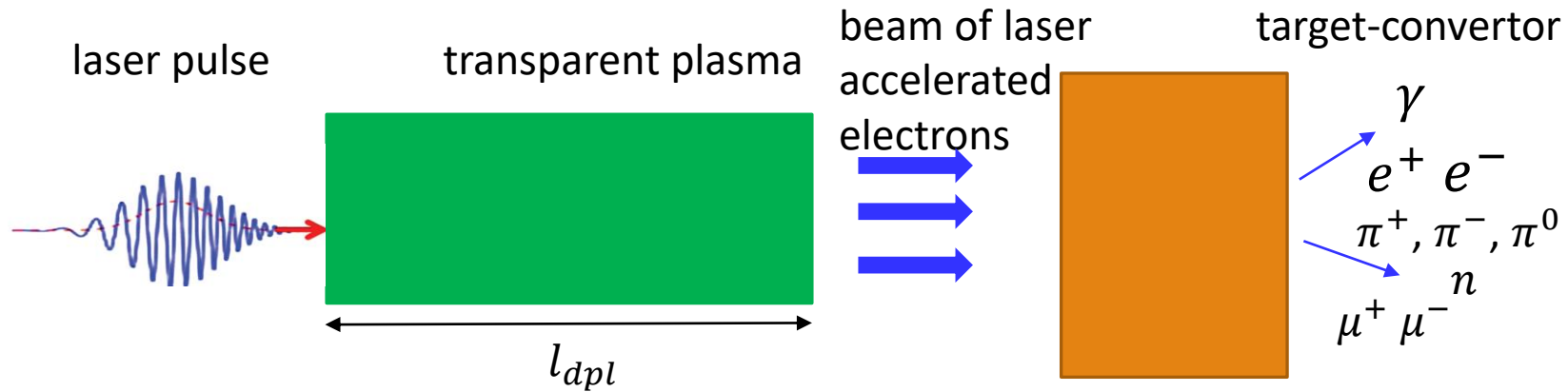
Широкое плато для лазерной пули
обусловлено стохастической инжекцией
в комбинированном лазерно-
плазменном поле.

**Результаты
моделирования для
лазерного импульса 2.2 Дж**

**V.Yu.Bychenkov, A.Castillo,
S.G.Bochkarev, M.G. Lobok,
JETP Letters 121, (2025),**

param./type	laser bullet				bubble			
a_0	74	42	34	27	25	10	6.7	4.0
τ , fs	6	10	15	20	6	10	15	20
D_0/λ	2.0	2.8	2.8	3.0	6	11.5	14.0	20
n_e/n_c	0.20	0.15	0.12	0.09	0.04	0.01	0.006	0.005
Q_{15} , nC	13.0	11.8	11.0	10.2	11.5	8.3	5.6	5.1
Q_{30} , nC	11.5	10.9	9.8	9.6	10.7	7.5	5.1	5.0
Q_{100} , nC	3.0	5.7	4.9	4.9	5.0	5.5	4.6	3.4
l_{dlp}/λ	70	120	160	180	130	600	1200	2700
η_{15} , %	44	51	47	45	48	57	47	38
η_{30} , %	42	50	46	43	47	56	47	37
η_{100} , %	32	37	33	35	37	49	43	32

Радиационно-ядерные применения



- Ускорение ионов
- электронная флэш-радиотерапия с использованием VHEE электронов (**60–250 МэВ**)
- Мощный ($\sim \text{ТВ/м}$) источник терагерцевых волн
- Яркий бетатронный рентгеновский источник с энергиями до МэВ
- Источник обратного комптоновского излучения
- Мощный мульти-МэВ тормозной источник
- Экранированная γ -радиография
- Ядерная гамма-флуоресценция для скрининга и безопасности
- Получение плазмы с высокой плотностью электрон-позитронных пар
- Источник нейтронов
- Ядерная фармакология (производство медицинских изотопов)
- Мезонная фабрика

В.Ю. Быченков,
Квантовая
электроника,
54, 5, 265–291 (2024)

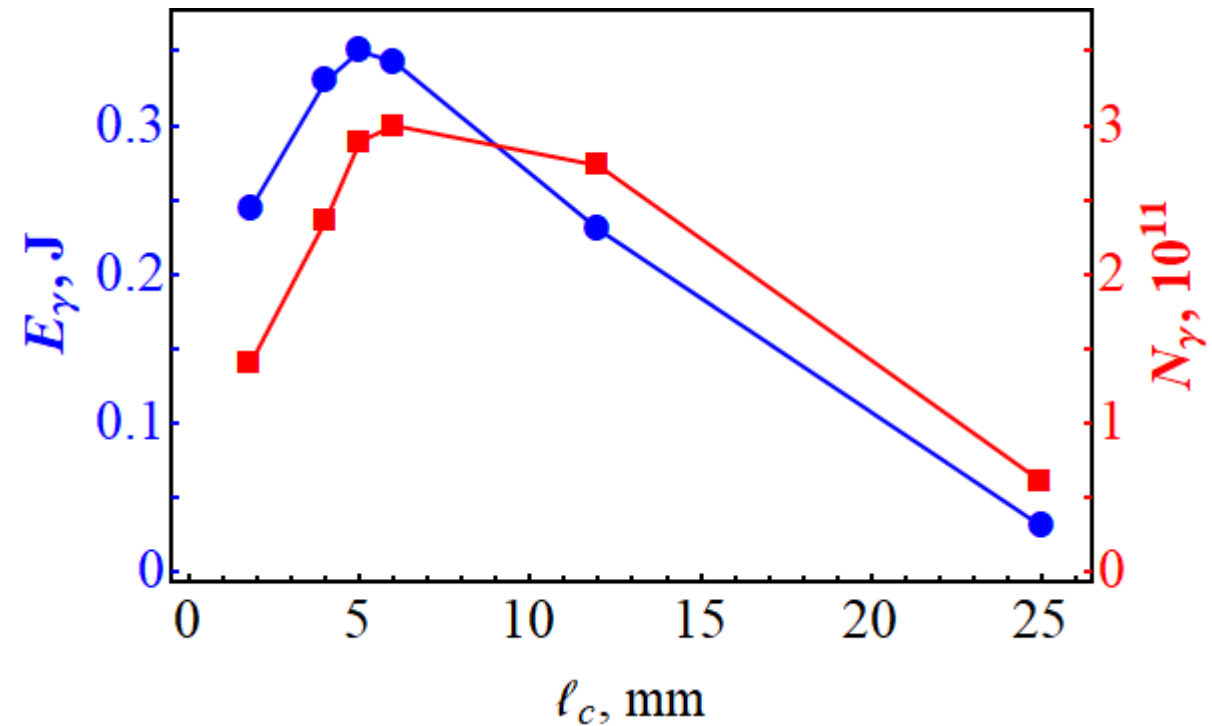
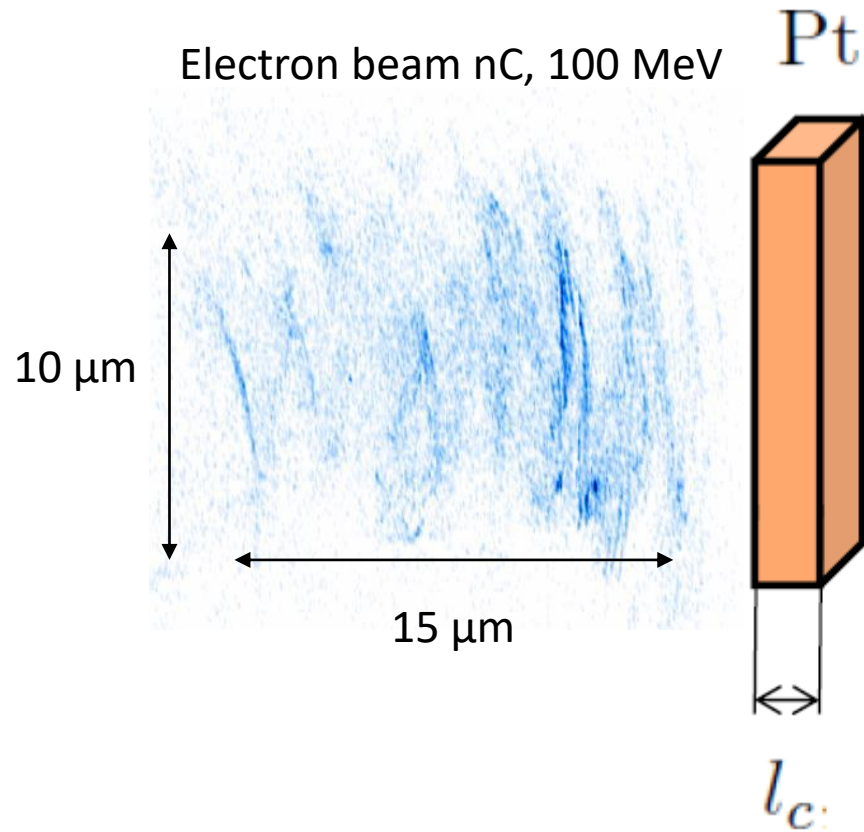
Выводы

- При заданной энергии лазерного импульса универсальным подходом является правильное согласование размера лазерного пятна и плотности электронов плазмы с длительностью лазерного импульса. Для достижения максимального выхода высокоэнергетических электронов рекомендуется максимально сжимать лазерный импульс.
- Оба рассматриваемых режима («пуля» и «пузырь»), в принципе, способны обеспечить высокий заряд сгустка таких электронов на уровне $\simeq 10$ нКл, для режима «лазерная пуля» это достигается с помощью более длинных импульсов (в несколько раз длинее), доступных без специального сжатия (см. метод CafCa).
- Универсальная платообразная форма спектра электронов, ускоренных в режиме «лазерная пуля», во многом отражает эффект стохастического набора энергии частицами за счёт сложной структуры ускоряющего поля, включающего как электростатическое поле каверны, так и лазерное поле внутри неё

**Thank you very much for your
attention!**

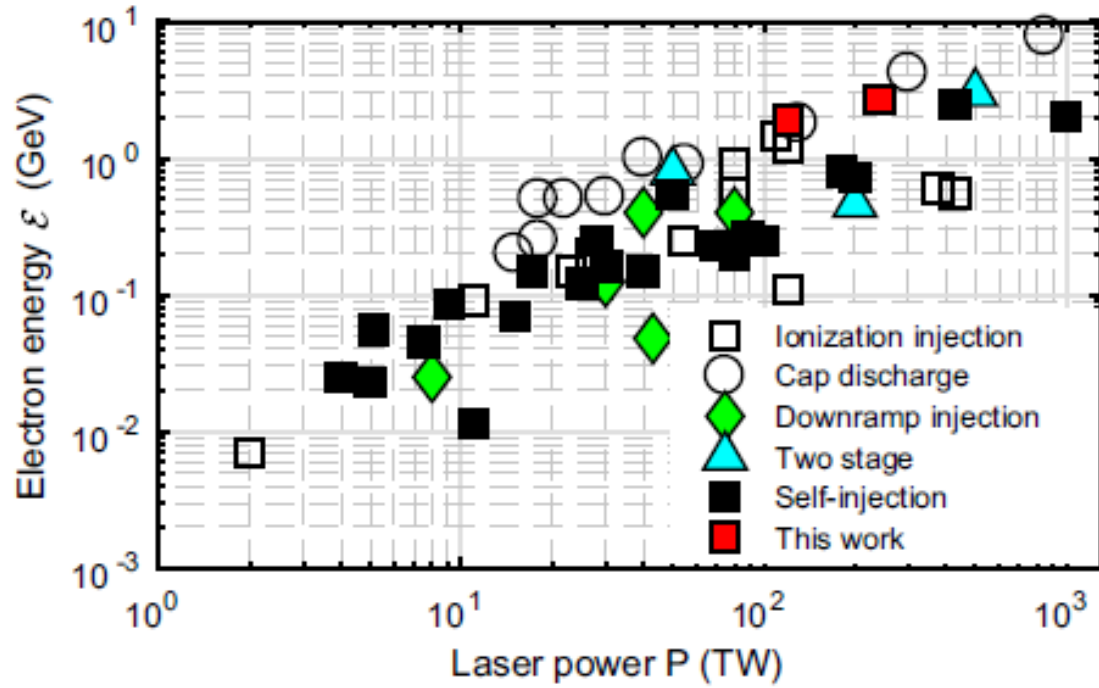
V.Yu.Bychenkov, A.J.Castillo, S.G.Bochkarev, M.G.Lobok, *JETP Lett.* **121**, 512 (2025).

Generation of gamma-radiation from electrons accelerated in RST regime



Conversion coefficient to gamma up to 9 %

Wake field acceleration (experiments)



PRL **132**, 195001 (2024)

$P = 230$ TW, $W_L = 5$ J, $Q_{\text{tot}} \simeq 100$ pC, $E_e = 1.8$ GeV,
 $n_e = 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

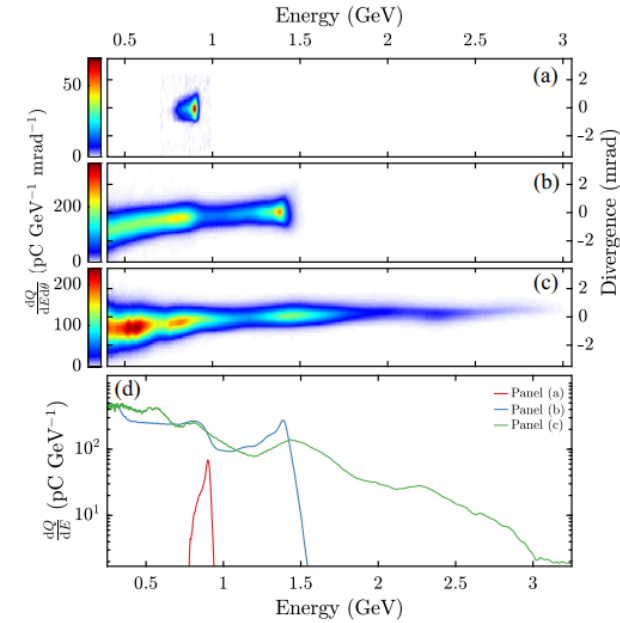
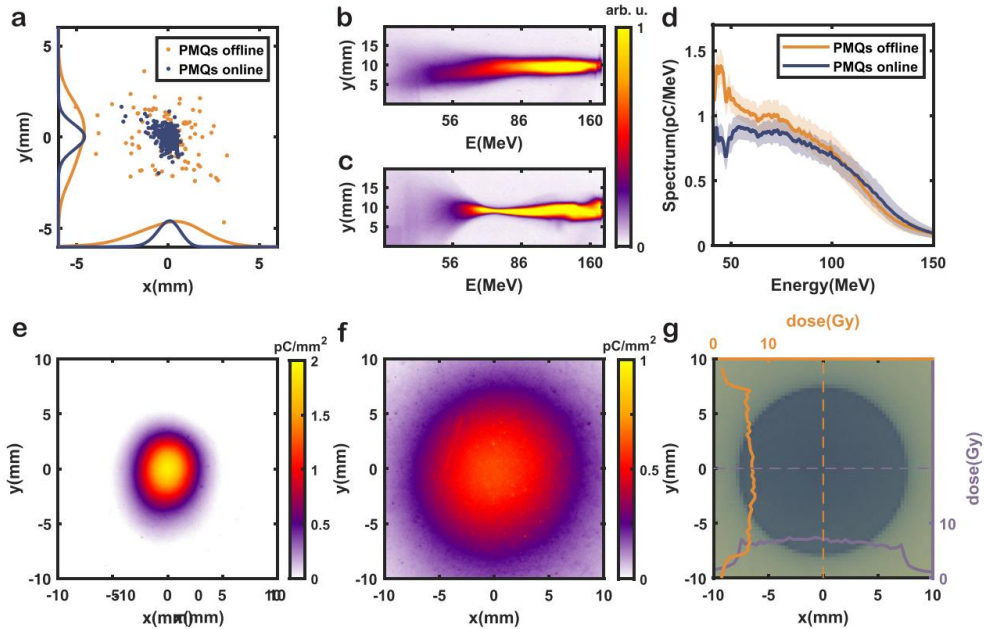


FIG. 1. (a)–(c) Sample electron spectrometer images: (a) narrow energy spread beam with $\varepsilon = (0.90 \pm 0.01)$ GeV and FWHM energy spread $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 4\%$, for $(P, L, n_e) = (215 \text{ TW}, 32 \text{ mm}, 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$; (b) beam with peak at $\varepsilon = 1.4$ GeV and $\Delta\varepsilon/\varepsilon = 10\%$, for $(240 \text{ TW}, 20 \text{ mm}, 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$; (c) multi-GeV electron beam, with cutoff at $\varepsilon_{\text{max}} = 2.7$ GeV for $(240 \text{ TW}, 20 \text{ mm}, 2.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$. Note the different color scales in (a)–(c). (d) spectra for (a)–(c).

Применение VHEE электронов (50-300 МэВ) для создания прототипа лучевой терапии



[Nature Communications](#) **16**, 1895 (2025)

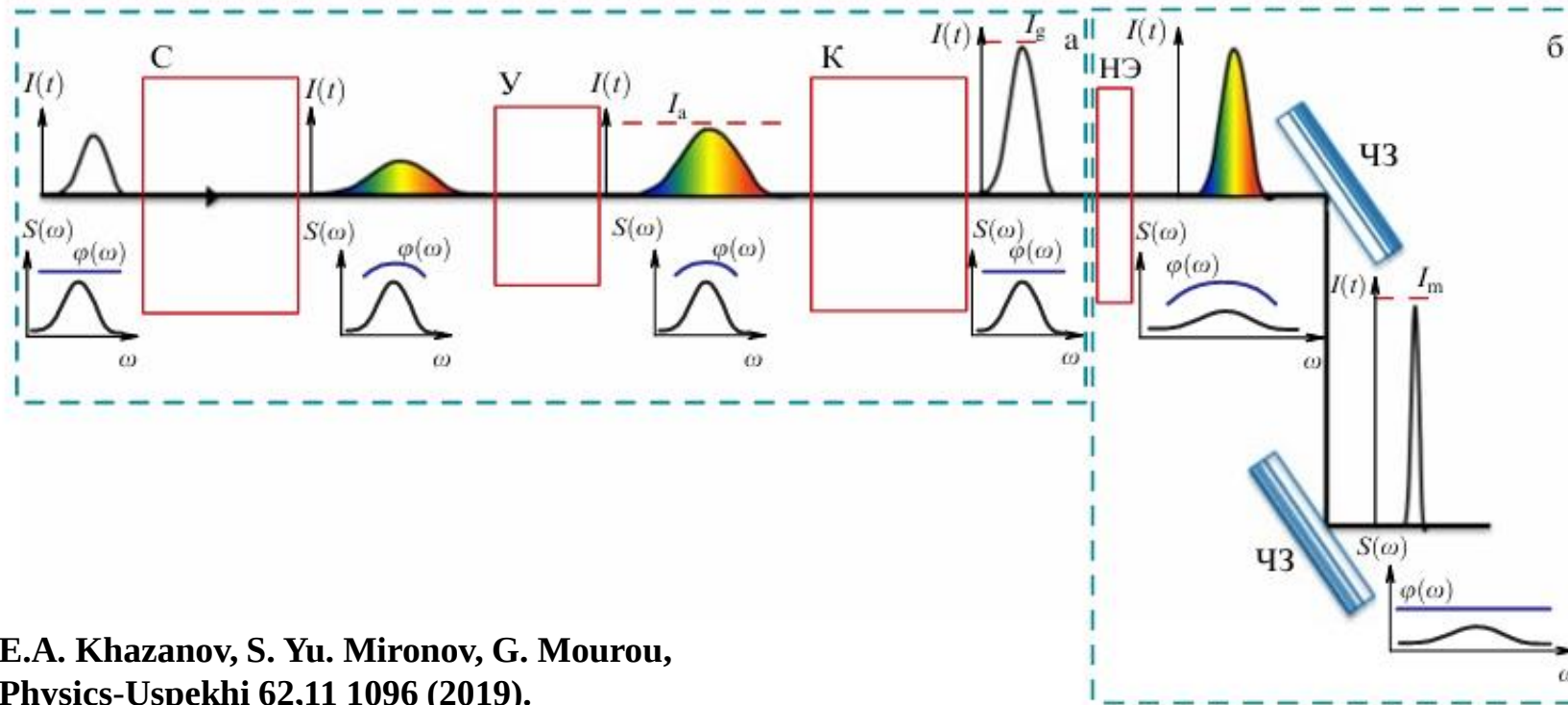
Представленное устройство на основе лазера, характеризующееся своей компактностью, операционной стабильностью, равномерной доставкой дозы и очевидными радиобиологическими эффектами, становится платформой для продвижения трансляционных исследований в области онкологической лучевой терапии на основе лазерно-плазменного ускорения (пузырь).

20 TW, 490 mJ, 25 fs

99% helium and 1% nitrogen

5.8 ± 0.2 Gy

CafCA Compression after Compression Approach



E.A. Khazanov, S. Yu. Mironov, G. Mourou,
Physics-Uspekhi 62,11 1096 (2019).

the pulse being shortened after passing a compressor (Compression after Compressor Approach (CafCA)). For this purpose, the pulse spectrum is broadened as a result of self-phase modulation, and the pulse is then compressed by dispersion mirrors.

Релятивистский самозахват (РСЗ) как сильно-нелинейный режим волноводного распространения импульса для ускорения электронов

$$a_0 \gg 1, a_0 = eE_0 / (m_e c \omega)$$

Получение ~10 нКл электронных пучков (с энергией выше 30 МэВ) для радиационно-ядерных приложений, эффективность преобразования ~50%

Lobol M.G., Brantov A.V., Gozhev D.A., Bychenkov V.Yu. Plasma Phys. Contr. Fus, 60, 084010 (2018)

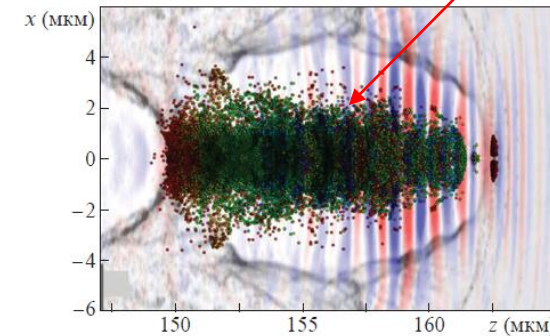
лазерная пуля сферическая из-за требования устойчивого распространения

$$c \tau \lesssim D, c \tau \lesssim \lambda_p, \\ \lambda_p = 2 \pi c \sqrt{\gamma_0} / \omega_p$$

бабл (пузырь) сферический из простых соображений

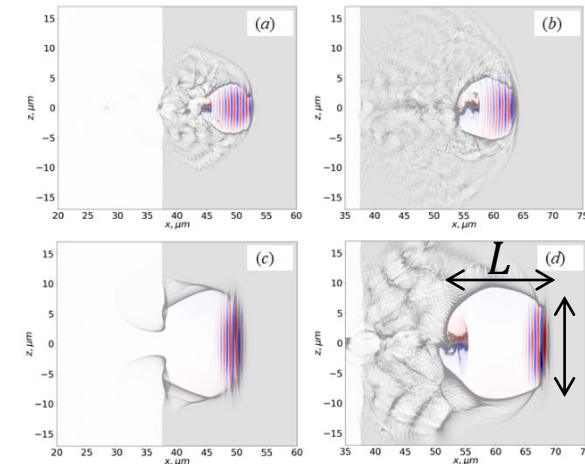
$$t_n \approx D/c, L \approx c t_n \approx D$$

захват лазерного света (пуля)



$$\frac{n_e}{n_c} = 0.1$$

точки – захваченные и ускоренные электроны



$$\frac{n_e}{n_c} = 0.15$$

$$\frac{n_e}{n_c} = 0.01$$

Самозахват для 40фс импульса (2.2Дж)

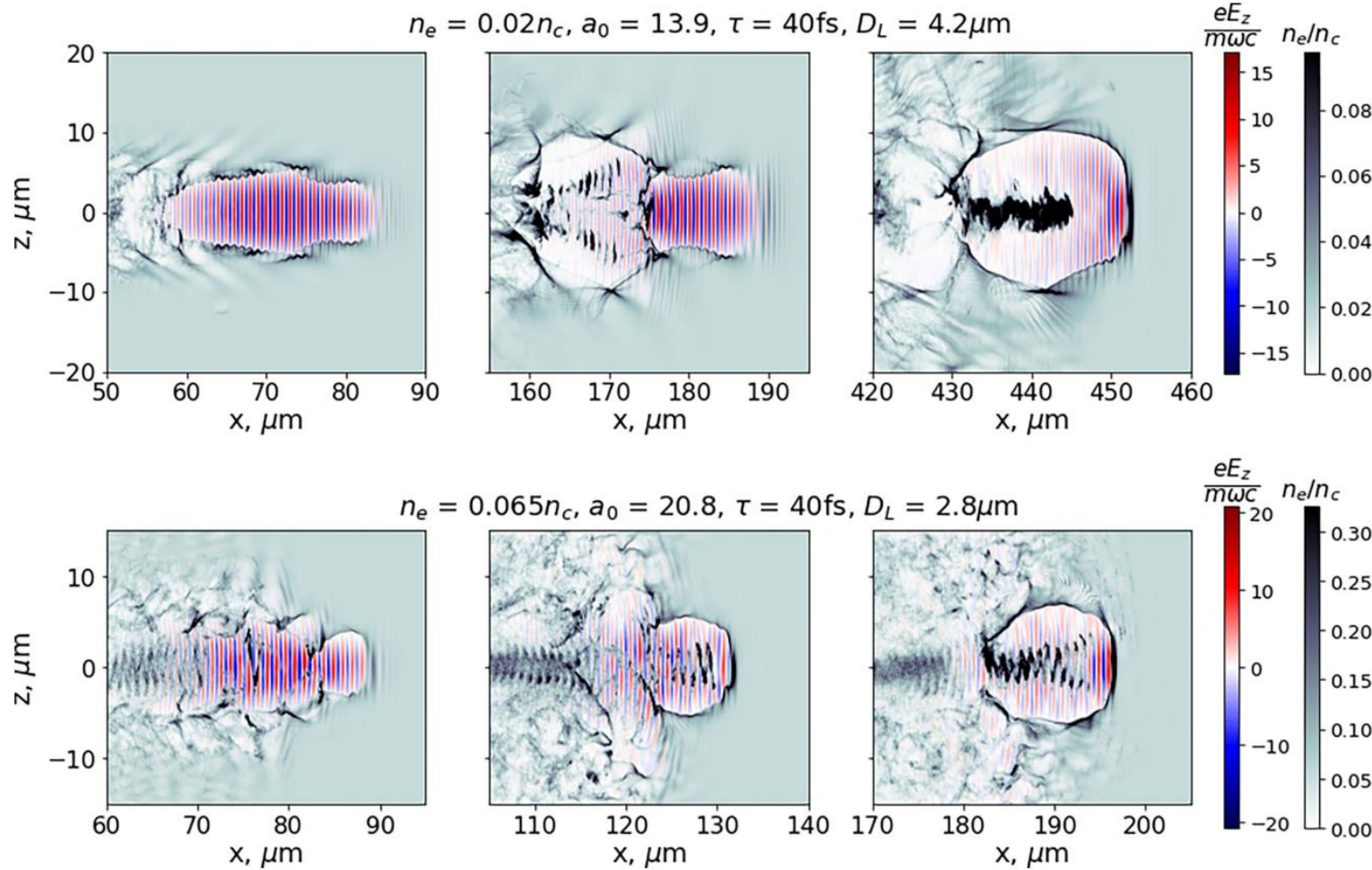


FIG. 4. Dynamics of the laser-plasma structure for the 40 fs laser pulse propagating through the plasma with $n_e = 0.02n_c$ (top frames) and $n_e = 0.065n_c$ (bottom frames). The electron density and E_z component of the laser pulse are shown in blue to gray and blue to red, correspondingly. The pulse parameters are $W_L = 2.2\text{ J}$, and $a_0 = 13.9$ (top) and 20.8 (bottom).

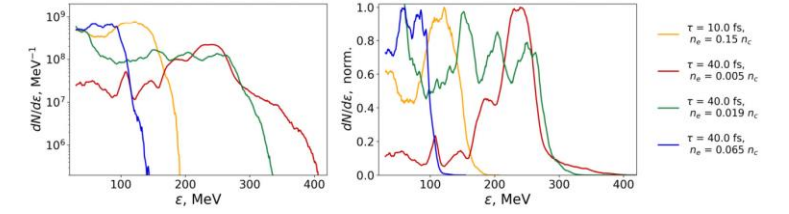


FIG. 5. Electron spectra that are formed at the instant when the electron bunch charge reaches the maximum value for different laser pulses with $W_L = 2.2\text{ J}$ in the logarithmic (left) and linear (right) scales.

Возможность профилирования струи с помощью ударной волны

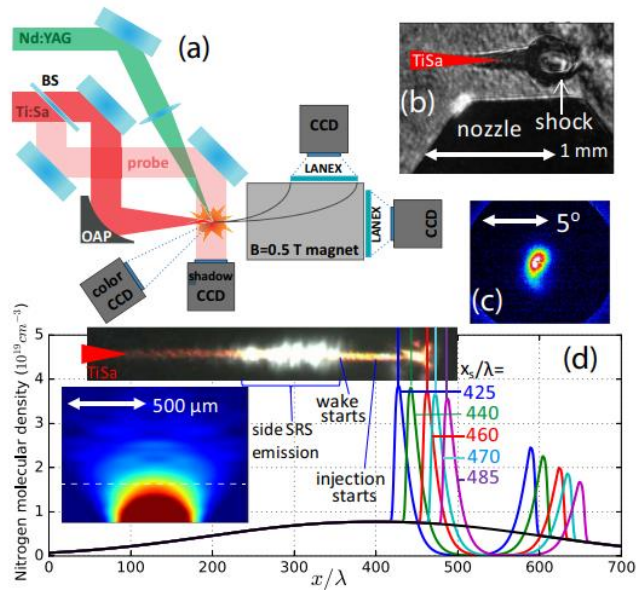


FIG. 1. (a) Experimental setup. The femtosecond Ti:Sa laser pulse (red beam) interacts with a gas jet modified by a blast wave from gas breakdown by an additional nanosecond Nd:YAG laser (green beam); (b) Shadowgraphy image of the jet with the blast wave and plasma channel from femtosecond beam; (c) The electron beam image; (d) Nitrogen molecular density in the blast wave for five different positions of its center (color lines, numbers - left maxima of the shock front) with respect to the unperturbed density profile (black line) obtained at a height of 300 μm above the nozzle exit (white dashed line in the left inset showing density map from interferometric measurements). The upper inset to (d) shows image of radiation scattered from the plasma channel with the shock front at 460 μm (red curve in (d)).

All-optical blast wave control of laser wakefield acceleration in near critical plasma

I. Tsymbalov et al, Phys. Rev. Lett. **134**, 025101 (2025)

используется дополнительный лазерный импульс для создания ударной волны в газовой струе, перпендикулярный направлению ускорения. За фронтом ударной волны концентрация плазмы резко падает, и процесс ускорения прекращается

Новая технология открывает совершенно новые перспективы для:

- медицины — адаптивная лучевая терапия с точной подстройкой под глубину опухоли;
- рентгеновских источников — генерация монохроматического излучения с регулируемой энергией;
- фемтосекундной дифракции — изучение сверхбыстрых процессов в материалах с переменной энергией зондирования.