

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера

**ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ  
ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВСТРЕЧНЫМИ КИЛЬВАТЕРНЫМИ  
ВОЛНАМИ**

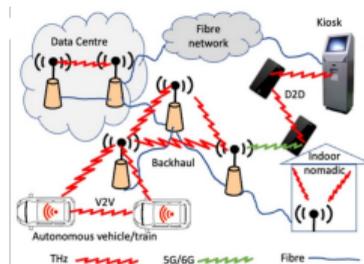
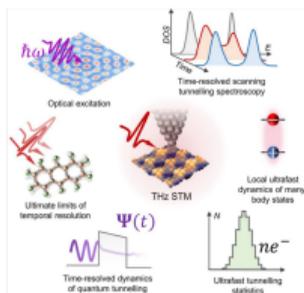
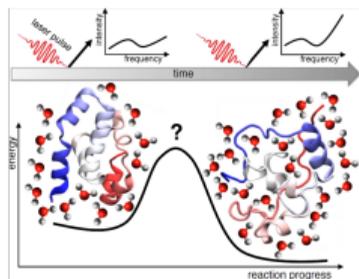
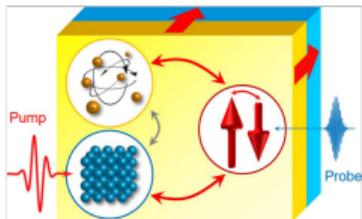
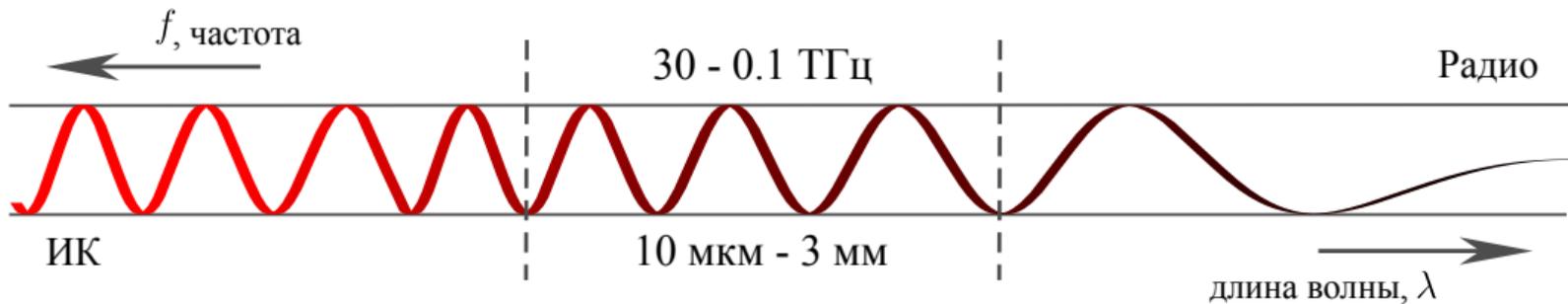
Анненков В. В., Берендеев Е. А., Волчок Е. П., Тимофеев И. В.



26 февраля 2026 г.



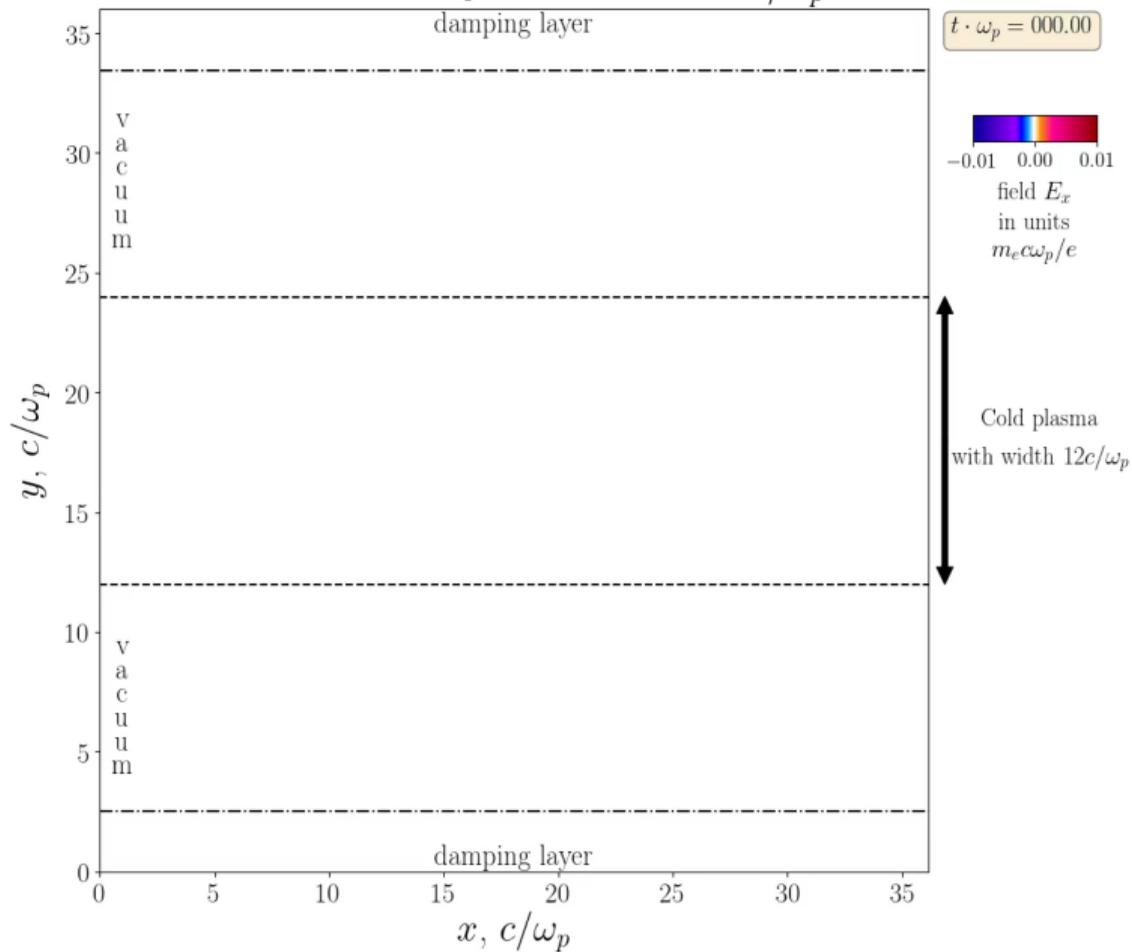
# Терагерцовый диапазон

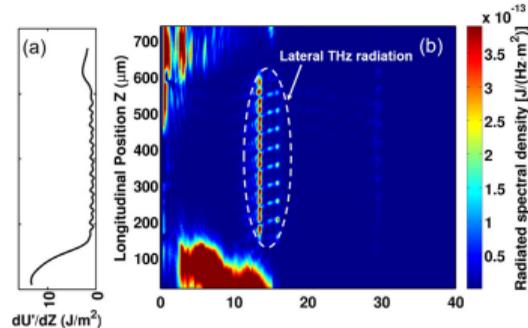
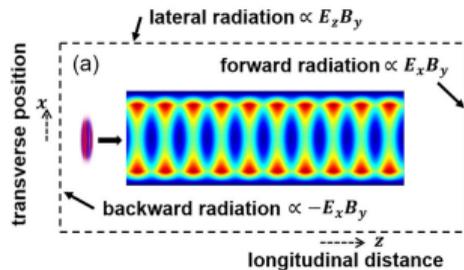
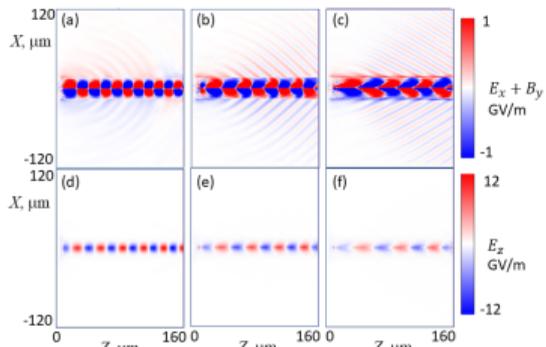


Leitenstorfer et al J. Phys. D:

Appl. Phys. 56 223001

One laser with  $a_0 = 0.4$  and  $\sigma = 2c/\omega_p$



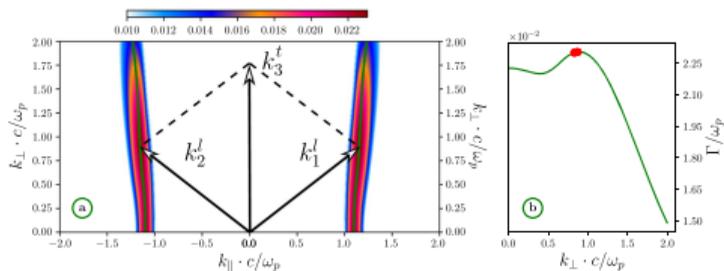


Miao et al. Phys. Plasmas 24, 043109

$$v_{phz} = \frac{\omega}{k_z} = \frac{c}{1 - c\tau/L}$$

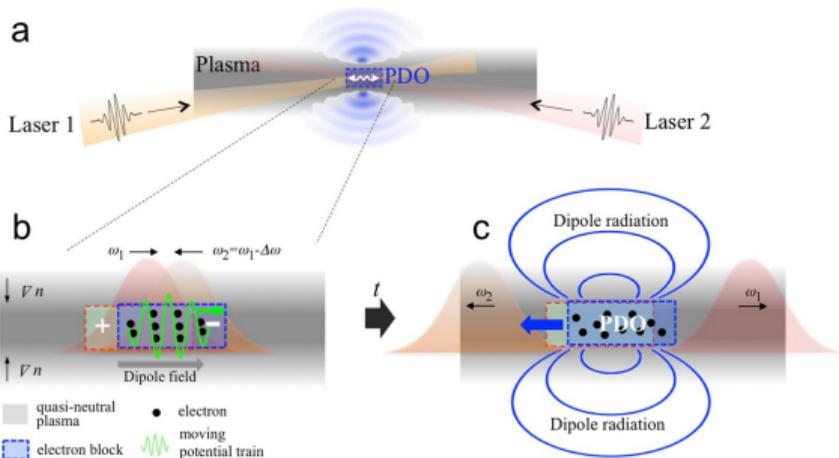
$$-\frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{B} + c^2 \nabla^2 \mathbf{B} - \omega_p^2 \mathbf{B} = -4\pi c \nabla \times \mathbf{j}_{wake}$$

Pukhov et al. Phys. Rev. Lett. 127, 175001



$$\begin{cases} \mathbf{k}_1^i + \mathbf{k}_2^i = \mathbf{k}_3^i, \\ \omega_p(\mathbf{k}_1^i) + \omega_p(\mathbf{k}_2^i) = \omega_p(\mathbf{k}_3^i), \end{cases} \quad \left| \omega_s(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_i) - \sqrt{k_z^2 + \frac{1}{4}} \right| \leq \Gamma(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_i), \quad (6)$$

V. V. Annenkov et al 2020 ApJ 904 88

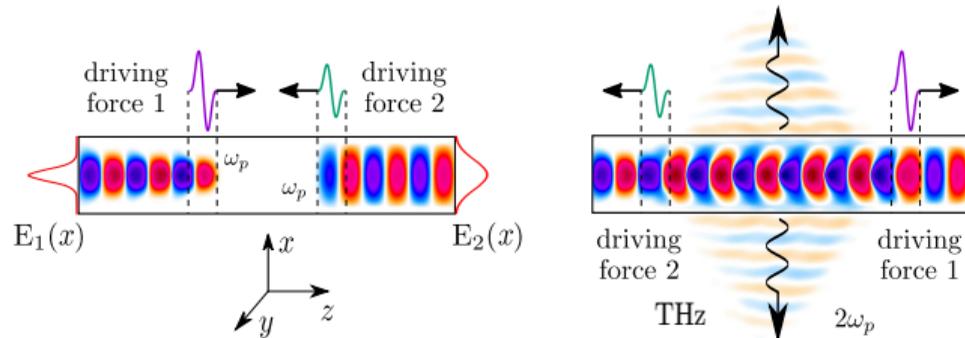


Kwon, K.B. et al. Sci Rep 8, 145



# Встречные плазменные волны: излучение на $2\omega_p$

$$(\omega_p, k_1) + (\omega_p, k_2) \rightarrow (2\omega_p, k_1 - k_2)$$

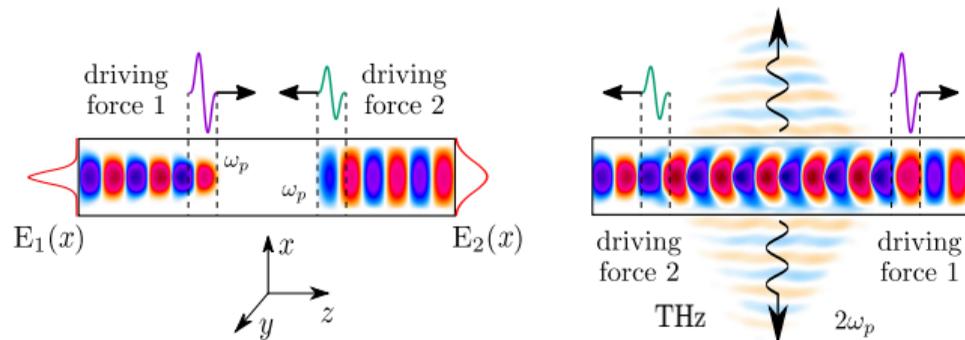


$$\mathcal{J} \propto \delta n_1 \delta v_{2z} + \delta n_2 \delta v_{1z} = \mathcal{J}_0 e^{-i2\omega_p t}$$



# Встречные плазменные волны: излучение на $2\omega_p$

$$(\omega_p, k_1) + (\omega_p, k_2) \rightarrow (2\omega_p, k_1 - k_2)$$

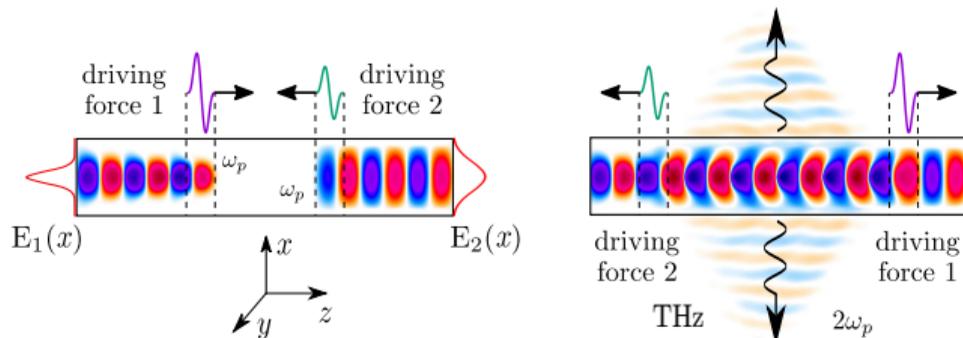


$$\mathcal{J} \propto (k_1 - k_2) \delta v_{1z} \delta v_{2z} + i \left( \delta v_{1z} \frac{\partial \delta v_{2x}}{\partial x} + \delta v_{2z} \frac{\partial \delta v_{1x}}{\partial x} \right)$$



# Встречные плазменные волны: излучение на $2\omega_p$

$$(\omega_p, k_1) + (\omega_p, k_2) \rightarrow (2\omega_p, k_1 - k_2)$$

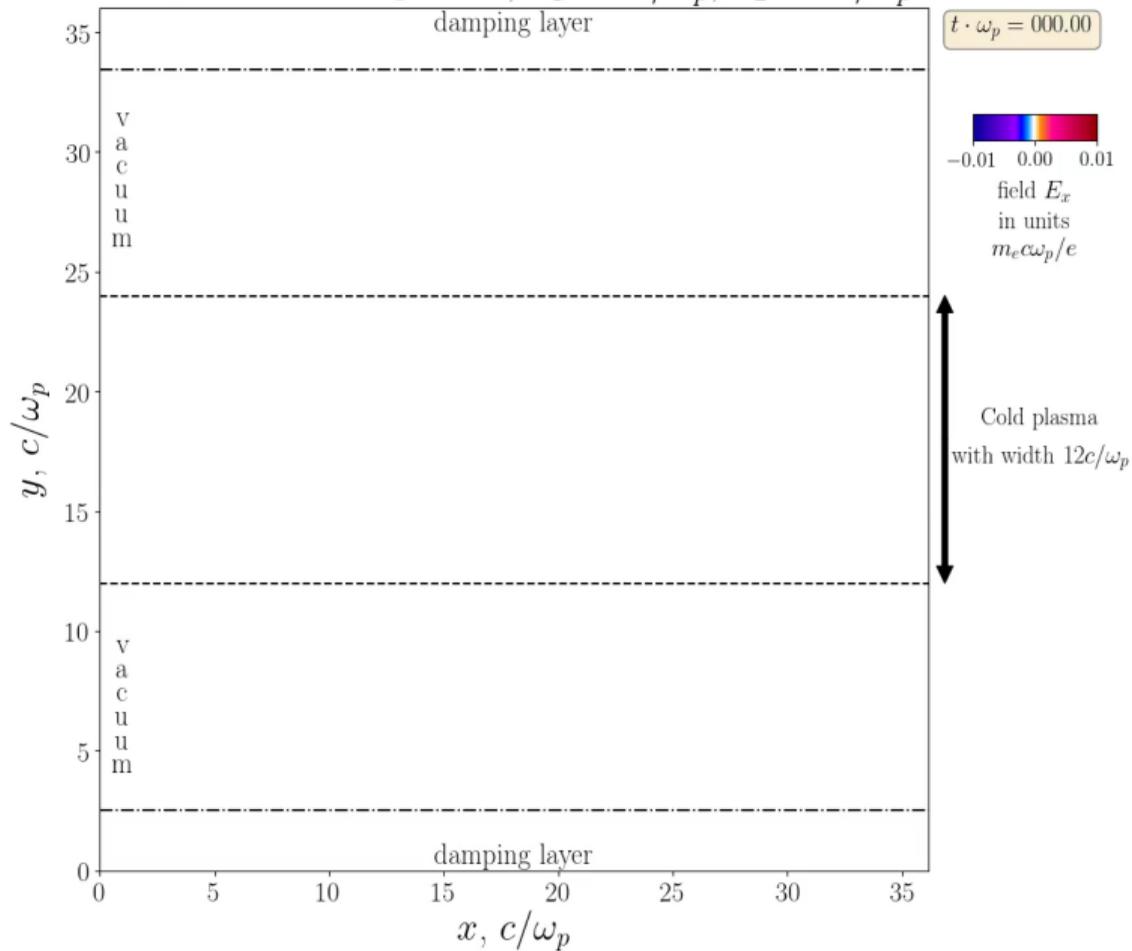


$$\Phi(t, \mathbf{r}) = \Phi_1(\mathbf{r}_\perp) e^{ikz - i\omega t} + \Phi_2(\mathbf{r}_\perp) e^{-ikz - i\omega t} + \text{K.C.}$$

$$v_s = \mp k \Phi_s(\mathbf{r}_\perp), \delta n_s = (\Delta_\perp - k^2) \Phi_s(\mathbf{r}_\perp).$$

$$\mathcal{J} = \frac{k}{4} (\Phi_1 \Delta_\perp \Phi_2 - \Phi_2 \Delta_\perp \Phi_1)$$

Two lasers with  $a_0 = 0.4$ ,  $\sigma_1 = 2c/\omega_p$ ,  $\sigma_2 = 4c/\omega_p$





# Возбуждение плазменной волны

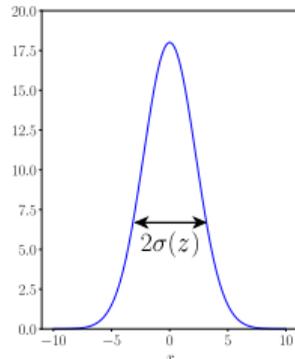
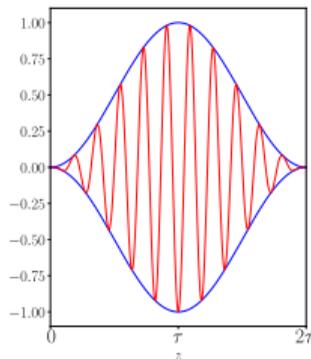
Огибающая лазерного импульса с частотой  $\omega_0$

$$a_s = a_{0s} \frac{\sigma_{0s}}{\sigma_s(z)} e^{-r^2/\sigma_s^2(z)} \sin^2 \left( \frac{\pi(t \pm z)}{2\tau} \right),$$

$$\sigma_s(z) = \sigma_{0s} \sqrt{1 + (z - z_s)^2/\mathcal{R}_s^2}, \quad \mathcal{R}_s = \omega_0 \sigma_{0s}^2/2.$$

Линейный режим:  $a_0 = \frac{p_{\perp}}{m_e c} \ll 1.$

Пондеромоторная сила для линейно поляризованного импульса  $F_p = -\nabla a^2/4,$



Кильватерная волна для  $\mathbf{E} = -\nabla \tilde{\Phi},$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 1 \right) \tilde{\delta n} = -\nabla \cdot \mathbf{F}_p, \quad \nabla^2 \tilde{\Phi} = \tilde{\delta n} :$$

$$\tilde{\Phi}(\mathbf{r}, t) = \int_0^t dt' \sin(t - t') \frac{a^2(\mathbf{r}, t')}{4}.$$

Оптимальная длительность лазерного импульса  $\tau \omega_p \approx \pi:$

$$\Phi(r) = \Phi_s^w \left( \frac{\sigma_0}{\sigma(z)} \right)^2 e^{-2r^2/\sigma^2(z)},$$

$$\Phi_s^w = \frac{3}{4} \frac{a_0^2 \sin \tau}{(4 - 5\tau^2/\pi^2 + \tau^4/\pi^4)}.$$

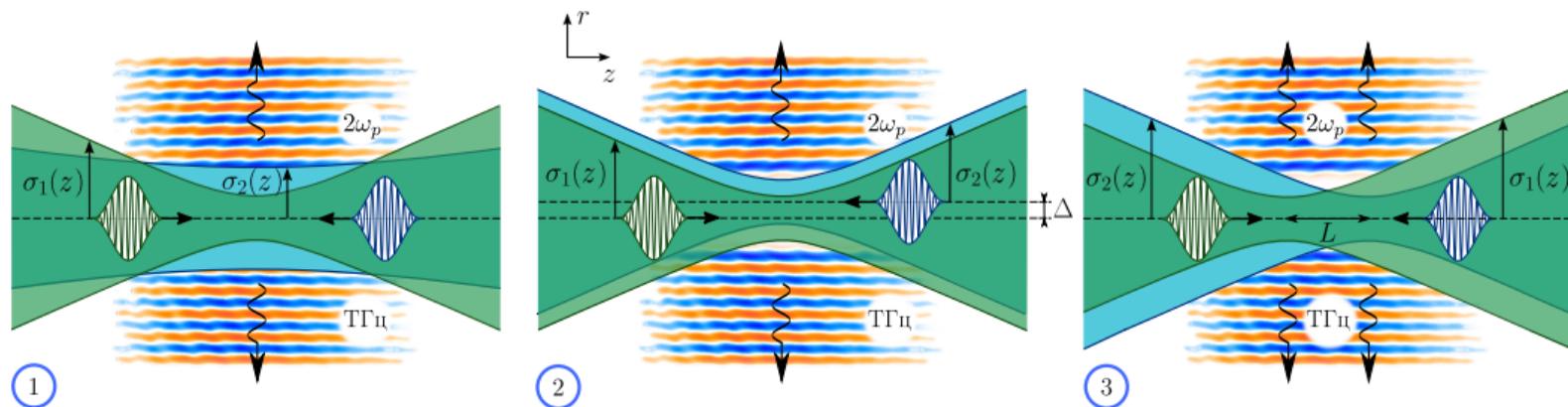
Волновое число  $k_{\parallel} = 1/v_g = 1/\sqrt{1 - 1/\omega_0^2} \approx 1,$   
частота волны  $\omega = 1.$

$$\mathcal{J} = \frac{k}{4} (\Phi_1 \Delta_{\perp} \Phi_2 - \Phi_2 \Delta_{\perp} \Phi_1)$$

Амплитуда излучаемой электромагнитной волны

$$\mathcal{E}_0 = \frac{3\Phi_1^w \Phi_2^w \mathcal{F}_{\sigma}}{2\sqrt{(2\sqrt{3}RJ_1 - J_0)^2 + 16R^2J_0^2}}, \quad \mathcal{F}_{\sigma} = \frac{\sigma_{01}^2 \sigma_{02}^2 |\sigma_2^2 - \sigma_1^2|}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2} \exp\left[-\frac{3}{8} \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right],$$

где  $J_n = J_n(\sqrt{3}R)$  функции Бесселя  $n$ -го порядка,  $R$  – радиус плазмы.

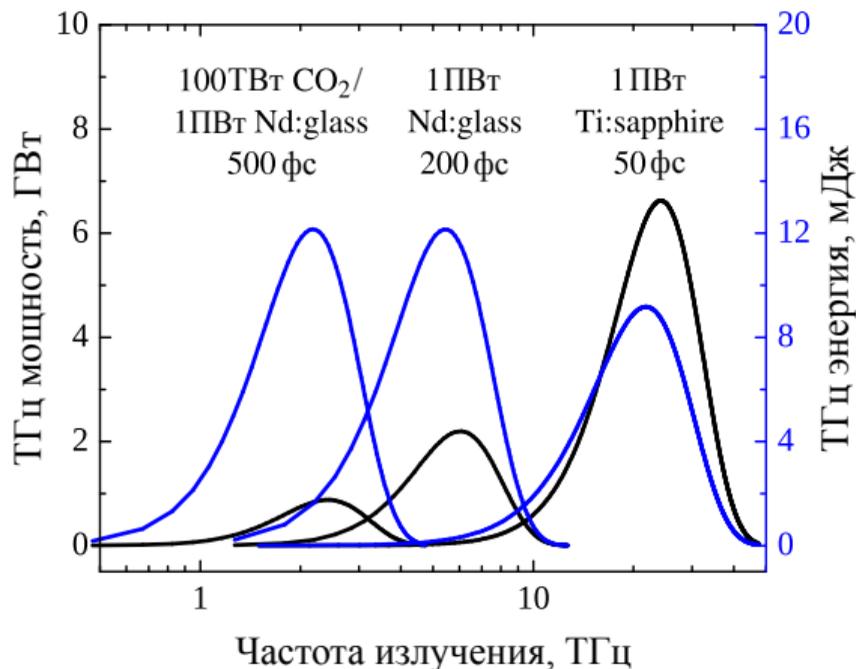
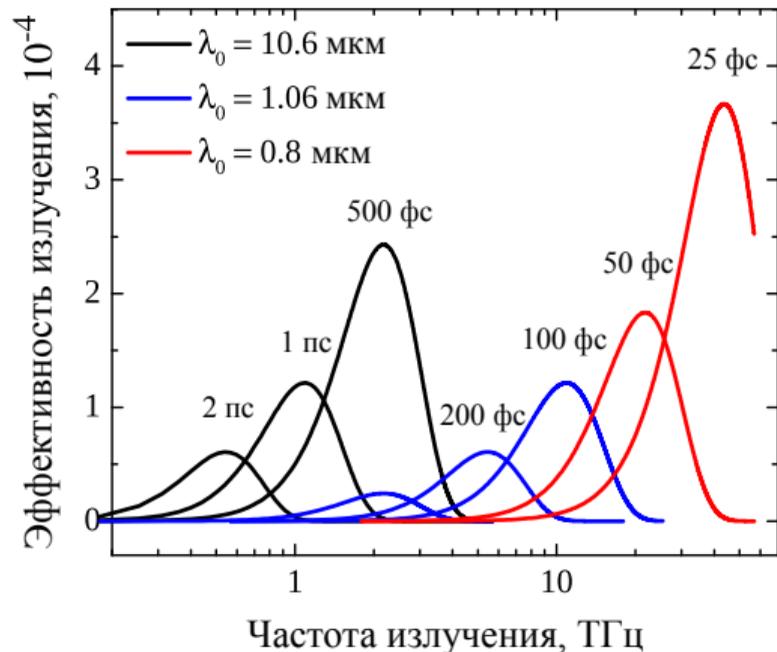


1. фокусные пятнца разного размера,  $\eta = \mathcal{W}_R/\mathcal{W}_L \approx 10^{-4}$ ;
2. прицельный параметр в поперечном направлении,  $\eta \approx 10^{-4}$ ;
3. прицельный параметр по продольной оси,  $\eta \approx 2 \cdot 10^{-4}$ ;



# Генерация $2\omega_p$ -излучения

$$\mathcal{P} = \frac{P}{P_0} = \pi R \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}_0^2 dz, \quad P_0 = \frac{m_e^2 c^5}{4\pi e^2} \approx 0.69 \text{ ГВт}, \quad \eta \approx \mathcal{P} \tau_R / \mathcal{W}_L \propto \omega_p / \omega_0, \quad f_R \propto \tau^{-1}.$$

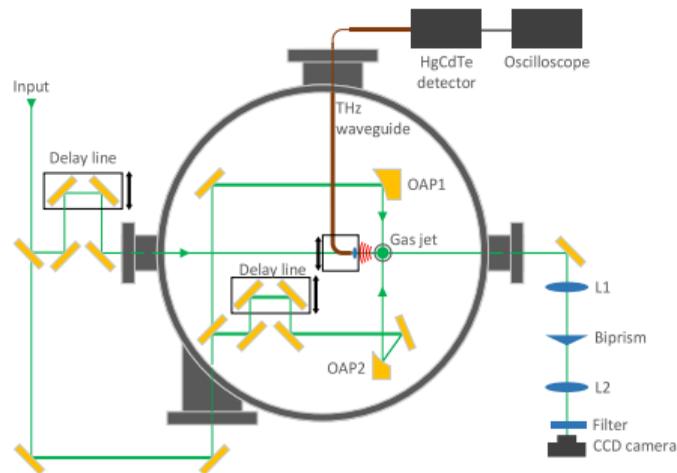




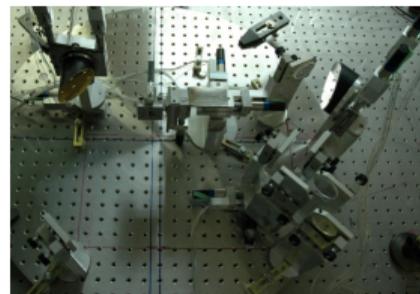
# Демонстрационный эксперимент в ИЛФ СО РАН

Двухканальная лазерная система на ОРСРА в кристаллах  $\text{BaV}_2\text{O}_4$  (BVO) и  $\text{LiV}_3\text{O}_5$  (LVO).

Длина волны  $\lambda_0 = 830$  нм, длительность импульса от 20 фс, энергия до 200 мДж.

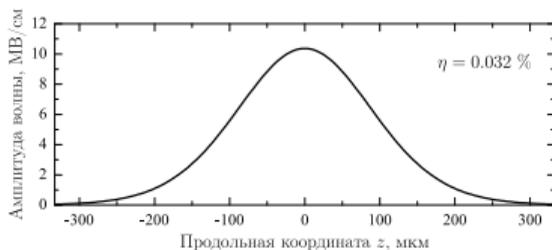
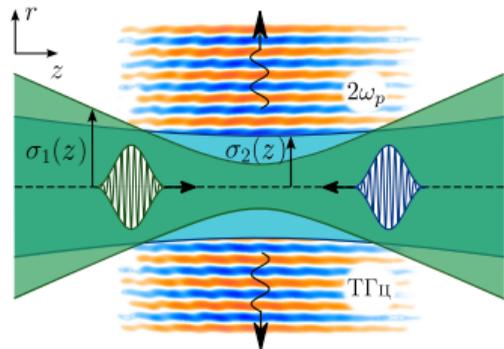


газовая струя  $10^{18} - 10^{19}$   
 $\text{см}^{-3}$ , число Маха 3–4.  
длительность 6 мс,  
диаметр плоской области  
1.2–1.5 мм.





# Параметры системы



Полная мощность и энергия импульса  $2\omega_p$ -излучения **57 МВт** и **57 мкДж**, соответственно. Эффективность конверсии  $\eta=0.032\%$ .

- Частота излучения  $2\omega_p/(2\pi)=28.4$  ТГц, плотность плазмы  $n_0 = 2.5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>;
- частота лазерного излучения  $\omega_0=25.4 = 2.27 \cdot 10^{-15}$  с<sup>-1</sup>, длительность импульса  $\tau \approx \pi = 39$  фс;
- энергия лазерной системы  $\mathcal{W}_L = \mathcal{W}_{L1} + \mathcal{W}_{L2} = 200$  мДж,  $\mathcal{W}_{Ls} = 3\pi/16 \tau \omega_0^2 a_{0s}^2 \sigma_{0s}^2$ ;
- первый лазерный импульс  $a_{01} = 0.67$  ( $I_0 = 8.9 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>) и  $\sigma_{01} = 1.86 = 6.3$  мкм, 8% энергии  $\approx 16$  мДж;
- второй  $a_{02} = 0.8$  ( $I_0 = 12 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>) и  $\sigma_{02} = 5.28 = 18$  мкм, 92% энергии  $\approx 184$  мДж;
- радиус ионизованного плазменного канала  $R=12 \approx 40$  мкм;
- длина излучающей области **0.6** мм;
- оценка длительности  $\tau_R \simeq 100 \omega_p^{-1} \approx 1$  пс.

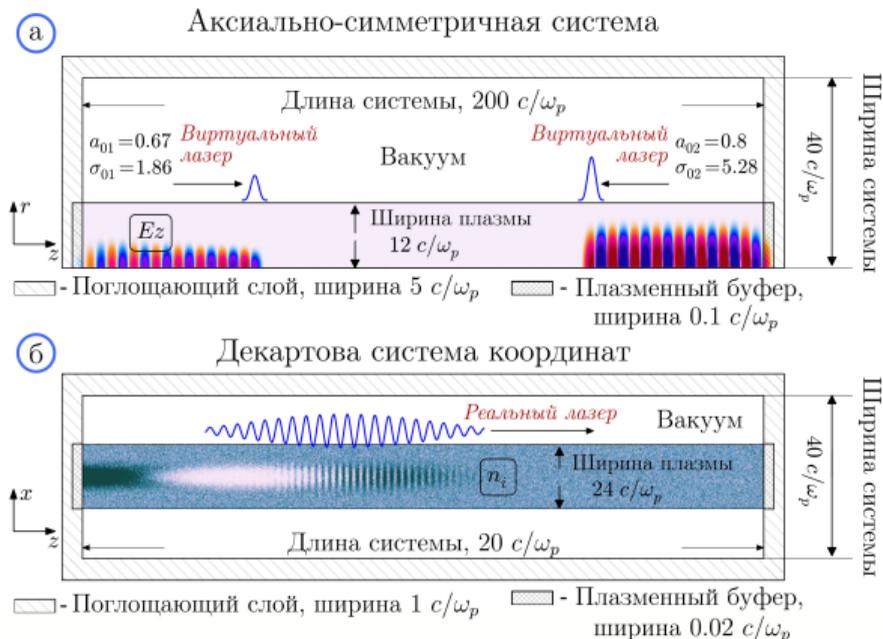


## Аксиально-симметричная геометрия

- виртуальный лазерный импульс
- $\Delta r = \Delta z = 0.05$  и  $\Delta t = 0.025$
- 144 частицы с параболическим форм-фактором

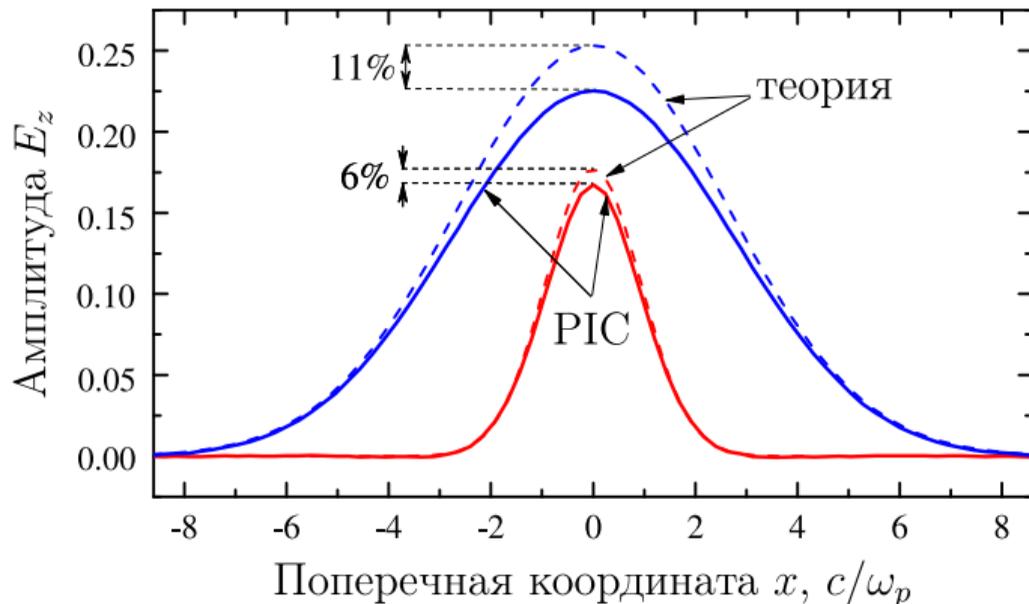
## Плоская геометрия

- реальные лазерные поля
- $\Delta x = \Delta z = 0.01$ ,  $\Delta t = 0.005$
- 81 частица в ячейке



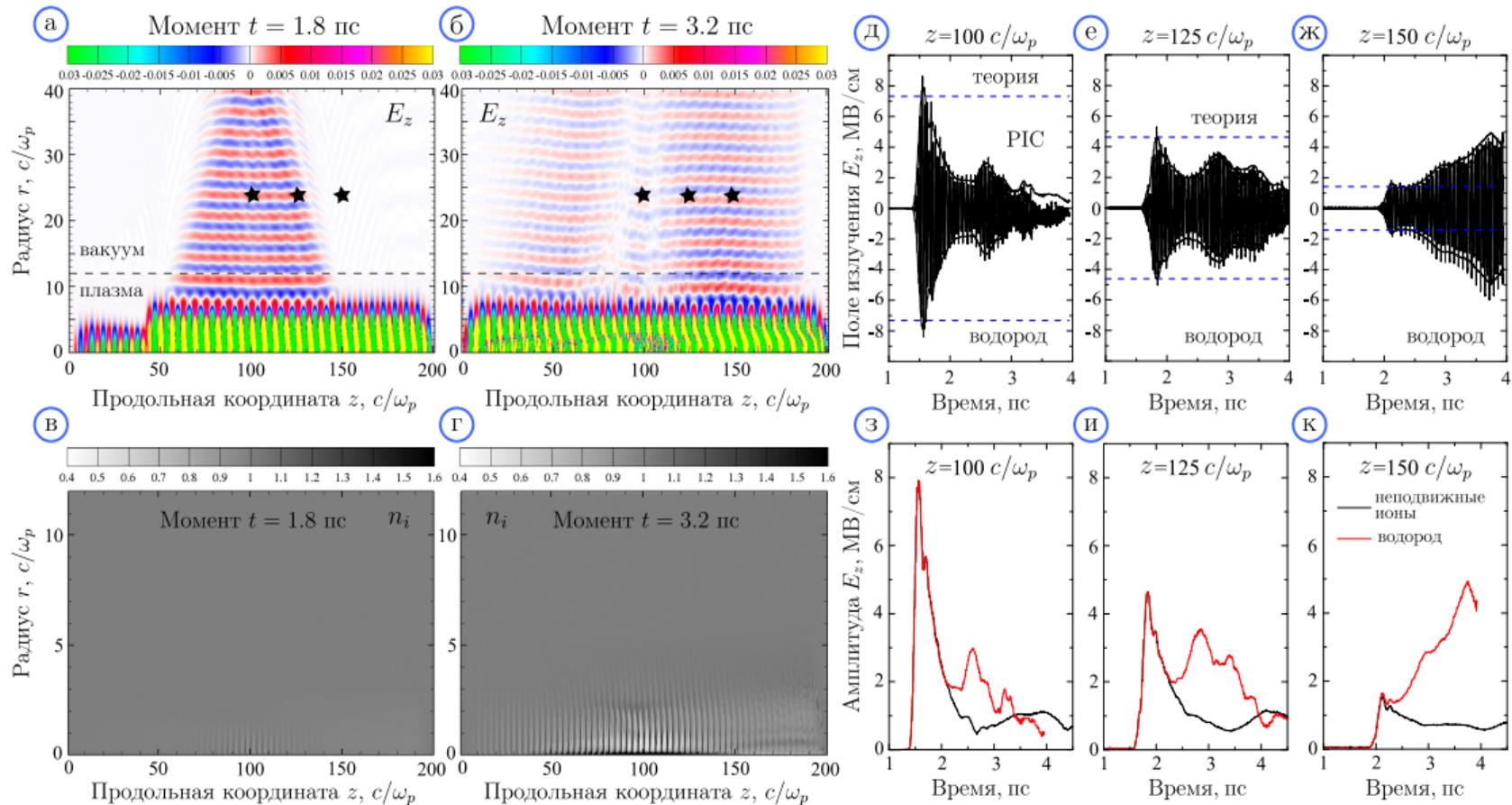


## Амплитуды кильватерных волн



Амплитуды кильватерных волн в области перетяжки: моделирование с реальным лазерным импульсом в сравнении с теорией.

Так как  $\mathcal{P} \propto \Phi_1^2 \Phi_2^2$ , эффективность излучения завышается не более чем на 30%.





# Эффекты ионной динамики

- Ионы конечной массы под действием пондеромоторной силы формируют модуляцию ионной плотности с периодом  $2k$ ;
- Рассеяние на модуляции с периодом  $q = 2k$  волн с частотой  $\omega = \omega_p$  приводит к излучению на второй гармонике по механизму плазменной антенны

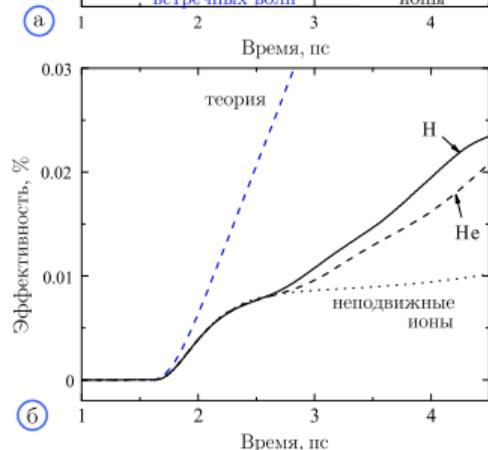
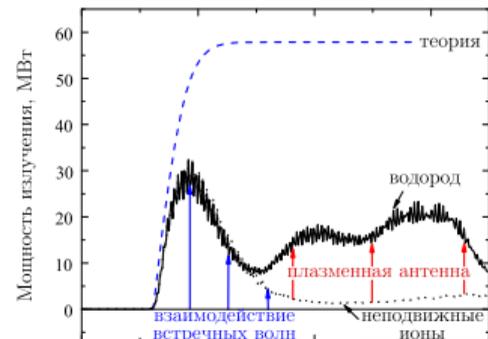
$$(\omega, k) + (0, -q) \rightarrow (\omega, k - q) \propto \delta n \Phi_s^w$$

$$(\omega, k) + (\omega, k - q) \rightarrow (2\omega, 2k - q) \propto \delta n (\Phi_s^w)^2$$

Volchok et. al. Plasma Phys. Control. Fusion 61

Annenkov et. al. Plasma Phys. Control. Fusion 61

- эта же модуляция приводит к уменьшению времени жизни кильватерной волны
- рабочим газом выбран **гелий**





# Эффекты ионизации

Вероятность ионизации

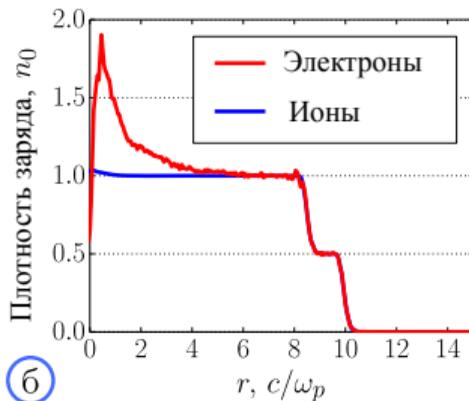
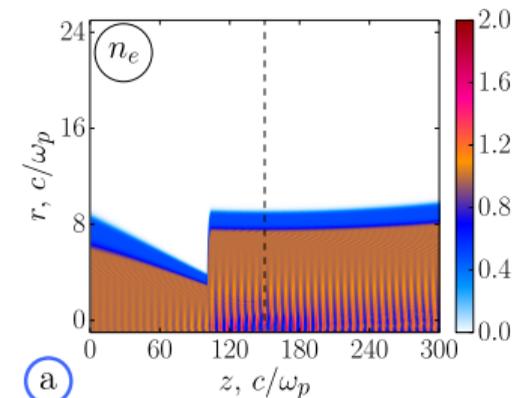
$$P_s = 1 - \exp\left(-\frac{1}{\omega_p} \int_{t_0}^t W_s(t') dt'\right),$$

скорость ионизации

$$W_s(E) = \begin{cases} W_{TI}(E), & E < E_1 \\ W_{BM}(E), & E_1 < E < E_2 \\ W_{BSI}(E), & E > E_2 \end{cases}$$

где  $E_1$  и  $E_2$  определяются из уравнений  $W_{TI}(E_1) = W_{BM}(E_1)$  и  $W_{BM}(E_2) = W_{BSI}(E_2)$ .

- $W_{TI}$  тунельная ионизация
- $W_{BM}$  модель Бауэра-Мюлсера  
D. Bauer, P. Mulser Phys. Rev. A 59, 569
- $W_{BSI}$  надбарьерная ионизация

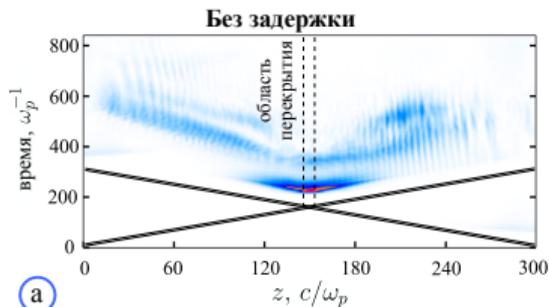
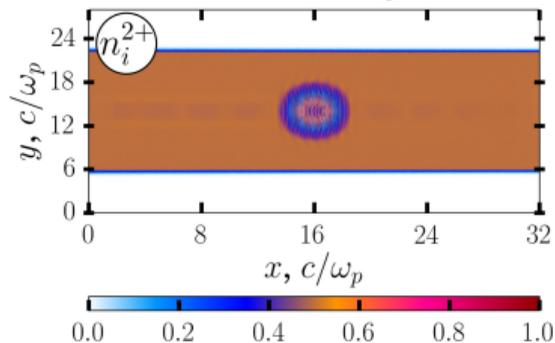




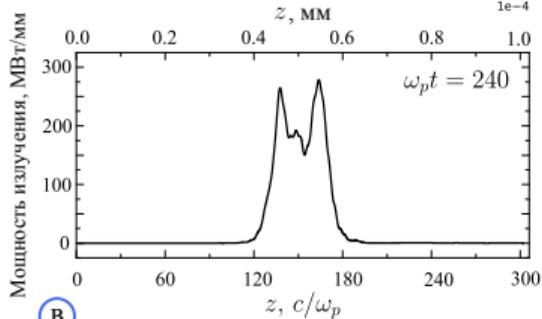
# Влияние области перекрытия лазеров

В месте встречи лазерных импульсов формируется стоячая э/м волна, которая своей пондеромоторной силой модулирует плотность ионов с периодом  $\lambda_0/2$ .

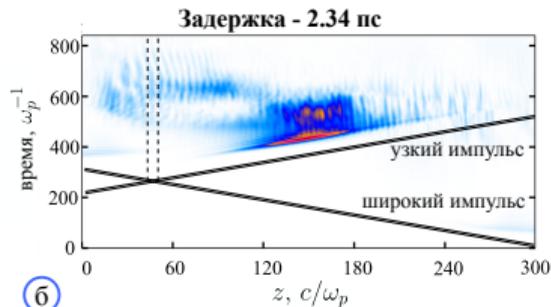
$$\delta n \sim n$$



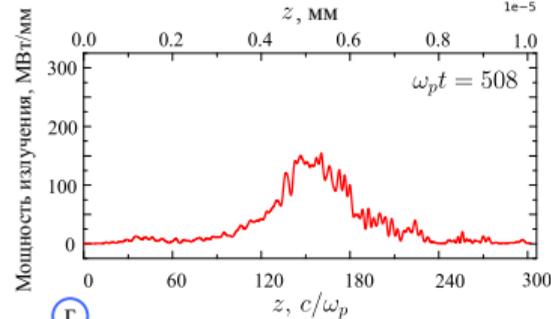
а



б



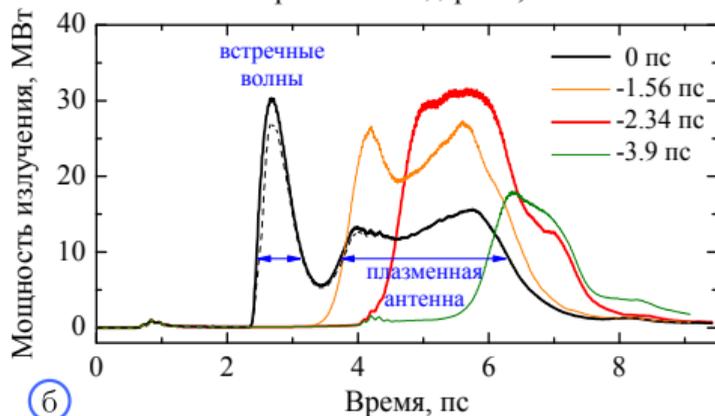
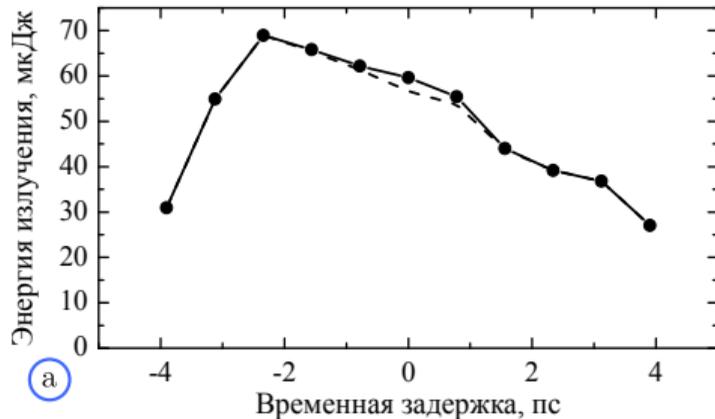
б



г



## Влияние области перекрытия лазеров

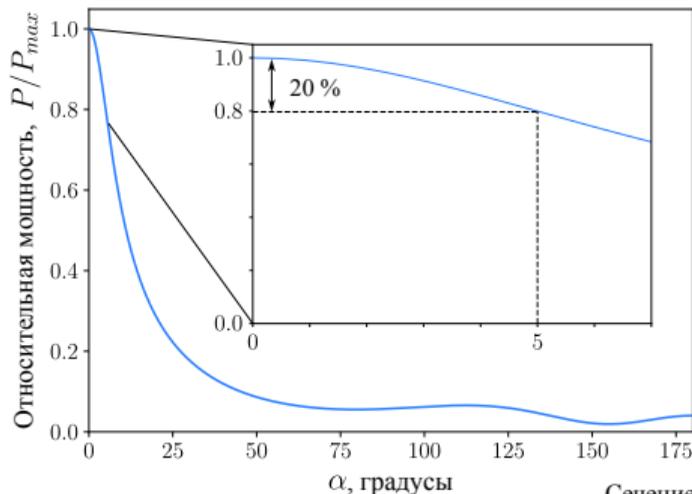


- При нулевой задержке из-за эффекта перекрытия максимальная мощность уменьшается на 12% (полная энергия излучения на 5%);
- Оптимальная временная задержка для узкого импульса 2.34 пс;
- При этой задержке импульс излучения короче, вклады двух механизмов неразличимы;
- Формирование радиального канала пониженной плотности, который способствует фокусировке энергии волн в области взаимодействия.

Minakov, V. et. al. Plasma Phys. Control. Fusion 61 114003



# Зависимость от угла

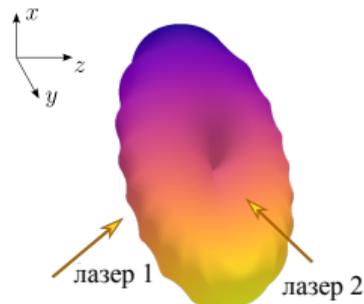


Угловое распределение мощности излучения

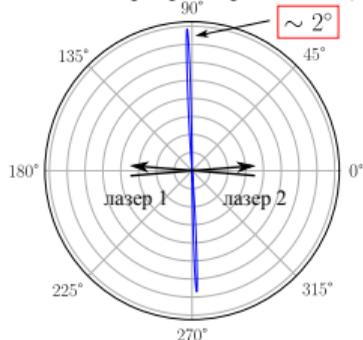
$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{k}{8\pi^2\omega\epsilon} \left| \int [\mathbf{J} \times \mathbf{k} e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} d^3r] \right|^2,$$

где  $\mathbf{k} = \sqrt{3}(\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta)$  волновой вектор излучаемой ЭМ волны

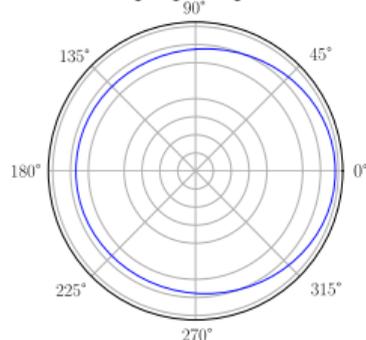
- полная мощность излучения монотонно спадает при увеличении угла;
- при  $\alpha < 5^\circ$  спад не превышает 20%;
- максимальная плотность энергии на расстоянии 10 см от источника 1.5 мкДж/см<sup>2</sup>.



Сечение при фиксированном  $\phi$

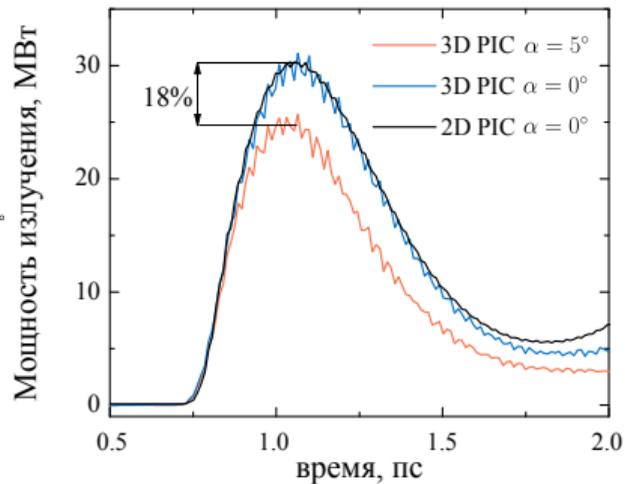
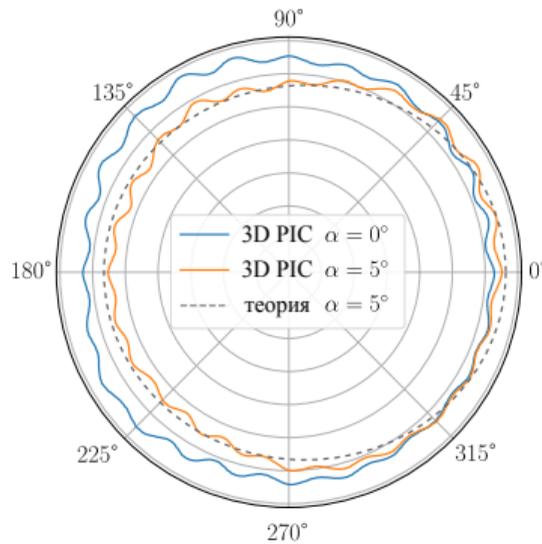
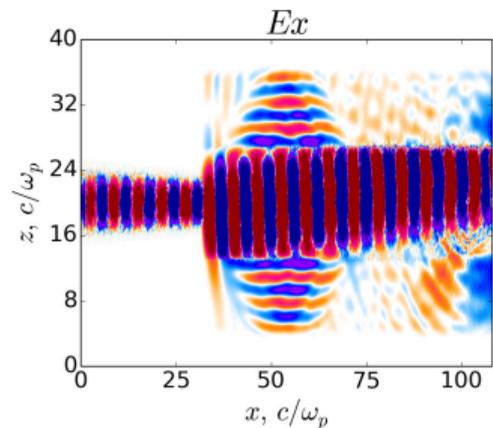
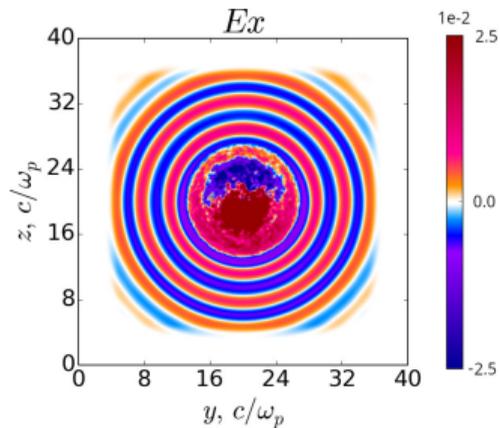


Сечение при фиксированном  $\theta$





# 3D PIC моделирование



- Угол  $\alpha = 5^\circ$ ;
- виртуальный лазерный импульс, ионизация, учёт ионной динамики;
- Шаг сетки  $dx = dy = dz = 0.1 c/\omega_p$ , шаг по времени  $dt = 0.5\omega_p^{-1}$ .

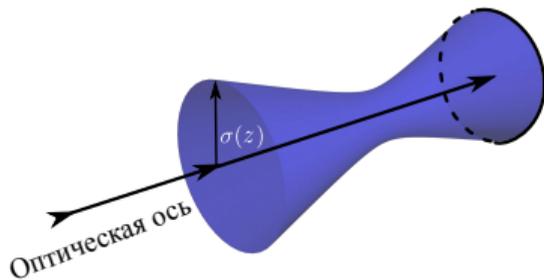
Для демонстрации эффекта генерации электромагнитного излучения на удвоенной плазменной частоте в процессе столкновения двух лазерных кильватерных волн с эффективностью преобразования энергии 0.02% эксперимент на тераваттной лазерной системе в ИЛФ СО РАН с полной энергией 0.2 Дж, длиной волны 830 нм и длительностью импульса 39 фс должен иметь следующие оптимальные параметры: встречные лазерные пучки с энергией 184 мДж и 16 мДж должны фокусироваться в центр сверхзвуковой гелиевой струи с плотностью  $(1.2 - 1.3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в пятна с радиусами 18 мкм и 6.3 мкм, приходя в фокальную плоскость с относительной задержкой в 2 – 2.5 пс, а угол между осями их распространения не должен превышать 5°.

# Нелинейное взаимодействие встречных профилированных плазменных волн

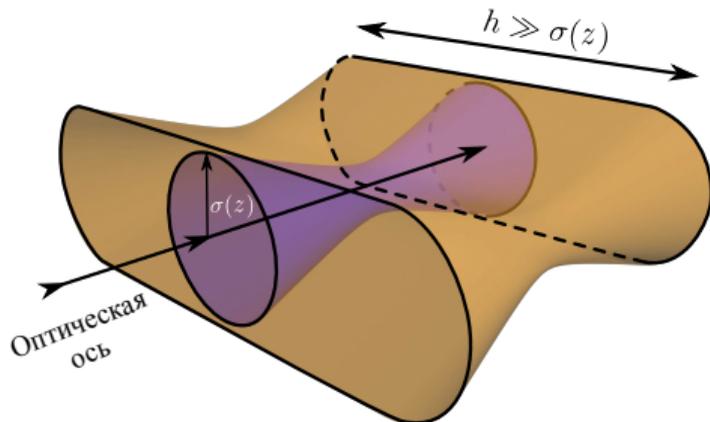
Энергия импульса



$$\sigma = \text{const} \text{ и } a_0 = E_0/\omega_0 = \text{const.}$$



Энергия импульса



Эффективность максимальна при

$$\sigma_{0s} \sim c/\omega_p.$$

Мощность излучения  $\mathcal{P} \propto a_{01}^4 a_{02}^4$ .

Чтобы получить узкую спектральную линию, необходимо сохранить невысокий уровень нелинейности.

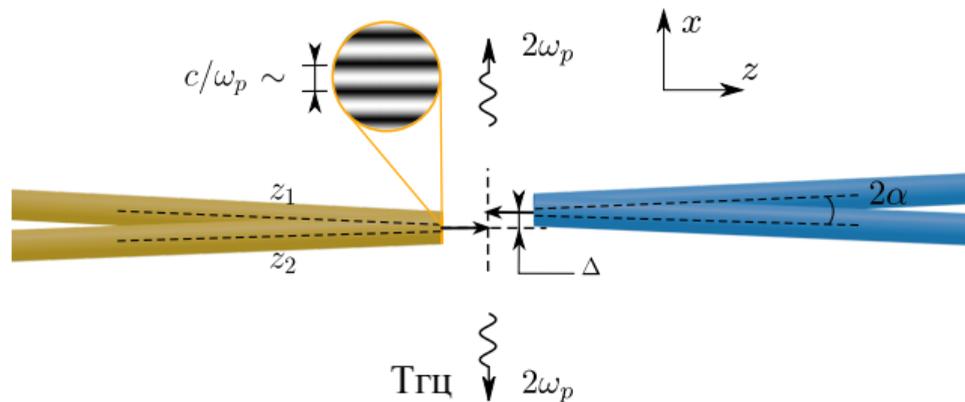
$$\delta n_s \propto a_{0s}^2 (1 + 8/\sigma_{0s}^2).$$

Для "круглых" гауссовых пучков невозможно масштабировать схему на более высокие энергии:

$$\mathcal{W}_{Ls} = \frac{3\pi}{16} \tau \omega_0^2 a_{0s}^2 \sigma_{0s}^2.$$



# Поперечно-модулированная кильватерная волна



Пондеромоторная сила для интерферирующих лазерных импульсов

$$\mathbf{F}_p = -\nabla \left[ \frac{a_1^2}{4} + \frac{a_2^2}{4} + \frac{a_1 a_2}{2} \cos(\kappa x) \right], \text{ где } \kappa = 2\omega_0 \sin \alpha.$$

Кильватерная волна  $\mathbf{E} = -\nabla\Phi$

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \int_0^t dt' \sin(t - t') \left[ \frac{a_1^2(\mathbf{r}, t')}{4} + \frac{a_2^2(\mathbf{r}, t')}{4} + \frac{a_1(\mathbf{r}, t')a_2(\mathbf{r}, t')}{2} \cos(\kappa x) \right].$$



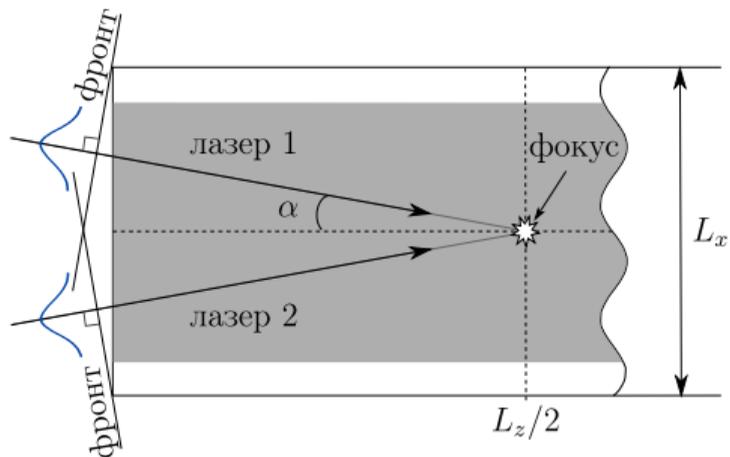
## Поперечно-модулированная кильватерная волна

$$a_s(x, z, t) = a_0 \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma_s(z_s)}} \exp\left(-\frac{x_s^2}{\sigma_s^2(z_s)}\right) \sin^2\left(\frac{\pi(t - t_0 - z_s)}{2\tau}\right) \times [\mathcal{H}(t - t_0 - z_s) - \mathcal{H}(t - t_0 - z_s - 2\tau)]$$

где  $s = 1, 2$ ,  $\mathcal{H}(t)$  – функция Хевисайда, и  $t_0 = \sin \alpha (L_x - L_z \tan \alpha) / 2$  – момент времени, когда центр лазерного импульса

$$x_s = \left(x - \frac{L_x}{2} + (-1)^{s+1} \frac{L_z}{2} \tan \alpha\right) \cos \alpha + (-1)^s z \sin \alpha,$$

$$z_s = (-1)^{s+1} \left(x - \frac{L_x}{2} + (-1)^{s+1} \frac{L_z}{2} \tan \alpha\right) \sin \alpha + z \cos \alpha.$$





## Поперечно-модулированная кильватерная волна

Плазменная волна, бегущая с групповой скоростью  $v_g = 1/\cos \alpha$  вдоль оси  $z$

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \Phi_0(\mathbf{r}) e^{i(z \cos \alpha - t)} + \text{к.с.}$$

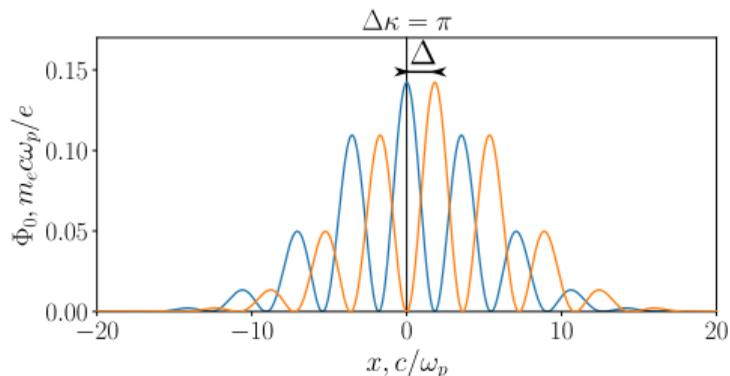
с амплитудой

$$\begin{aligned} \Phi_0(\mathbf{r}) = & -\frac{ia_0^2 \sigma_0}{4[(\tau/\pi)^2 - 1][(\tau/\pi)^2 - 4]} \exp\left(-i\tau + i\frac{L_x}{2} \sin \alpha\right) \times \\ & \left\{ 3 \sin \tau \left[ \frac{\exp(-2x_1^2/\sigma_1^2)}{\sigma_1} \exp\left(-i\left(x - \frac{L_x}{2}\right) \sin \alpha\right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\exp(-2x_2^2/\sigma_2^2)}{\sigma_2} \exp\left(i\left(x - i\frac{L_x}{2}\right) \sin \alpha\right) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{\exp(-x_1^2/\sigma_1^2 - x_2^2/\sigma_2^2)}{\sqrt{\sigma_1 \sigma_2}} \cos\left(\kappa\left(x - \frac{L_x}{2}\right)\right) \times \right. \\ & \left. \left. \times \left[ -\left(4 - \frac{\tau^2}{\pi^2} + \left(2 + \frac{\tau^2}{\pi^2}\right) \cos \mu\right) \sin \nu + 3\frac{\tau}{\pi} \sin \mu \cos \nu \right] \right\}, \end{aligned}$$

$$\text{где } \mu = \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{L_x}{2}\right) \sin \alpha, \quad \nu = \left(x - \frac{L_x}{2}\right) \sin \alpha - \tau.$$



## Оптимальные параметры системы



Работа тока над полем излучения максимальна, если период его модуляции совпадает с пространственным периодом э.м. колебаний в плазме:

$$\kappa = k_{\perp} = \sqrt{1 - \omega^2}, \quad \omega = 2,$$

Амплитуда излучения максимальная при  $\kappa\Delta = 2\Delta\omega_0 \sin \alpha \approx \pi$ , оптимальный угол сведения лазерных импульсов

$$\alpha = \arcsin \left( \sqrt{3}/(2\omega_0) \right).$$

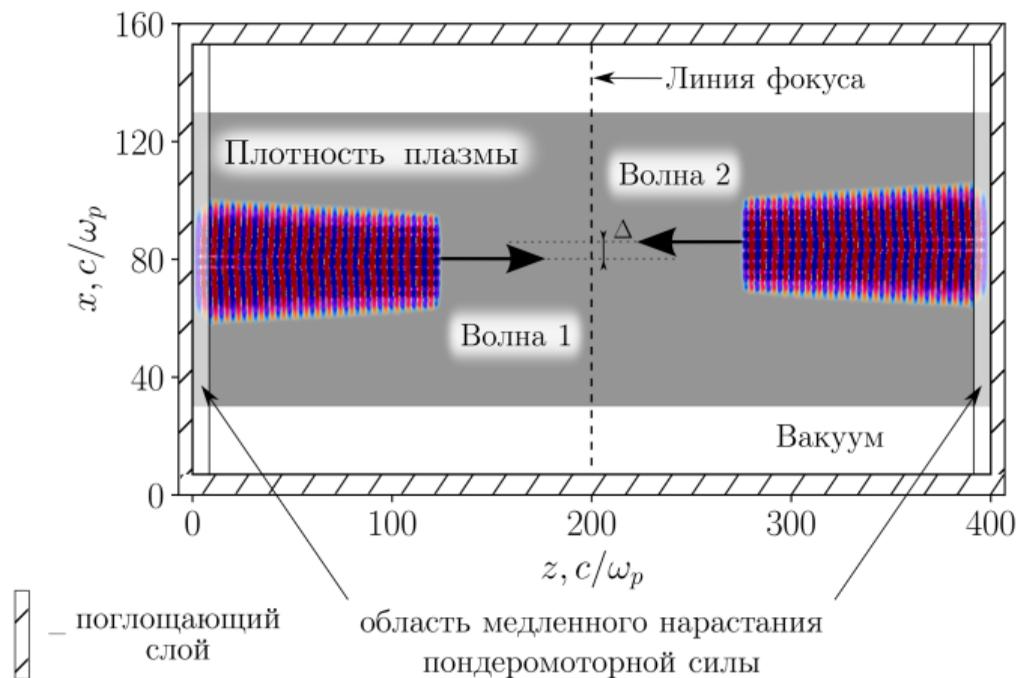
Плотность плазмы  $n_0 = 2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , частота излучения  $2\omega_p/(2\pi) = 28.4 \text{ ТГц}$ ;

Длина волны лазера  $\lambda_0 = 830 \text{ нм}$ , длительность  $\tau \approx \pi/\omega_p = 39 \text{ фс}$ ;

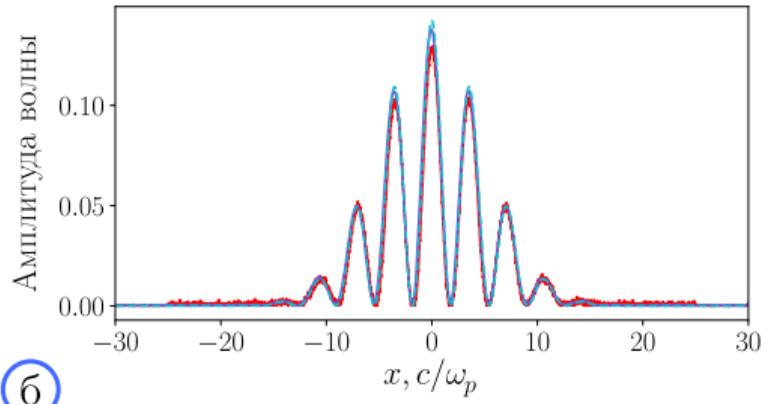
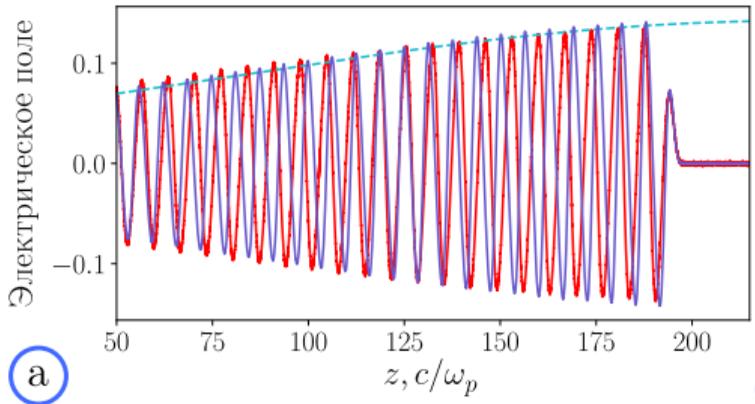
Размер фокуса  $\sigma_0$  от  $10 c/\omega_p$  до  $30 c/\omega_p$ ,  $\sigma_y = 100 c/\omega_p$ .



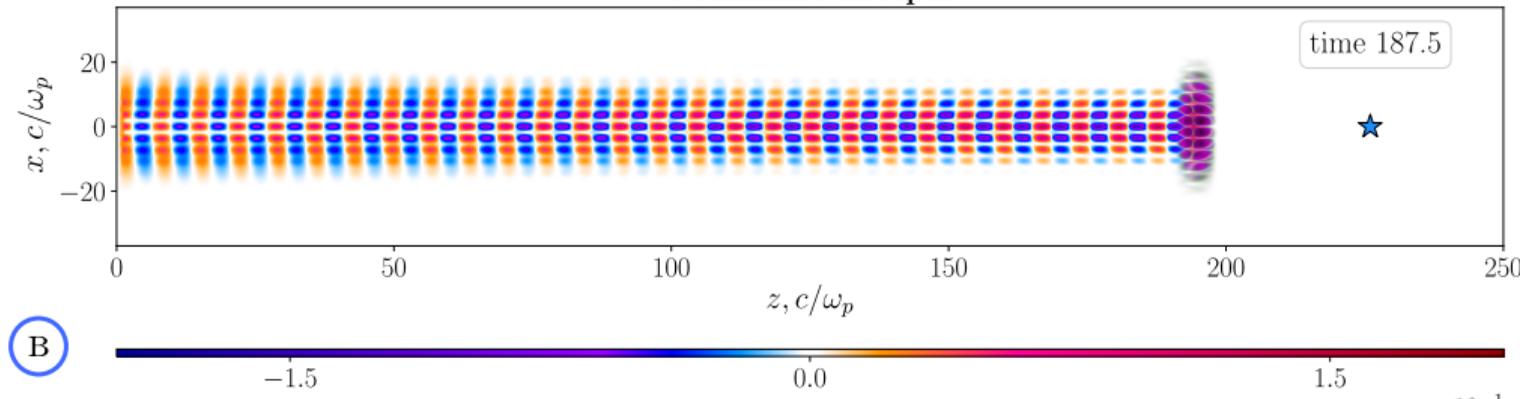
# Численное моделирование

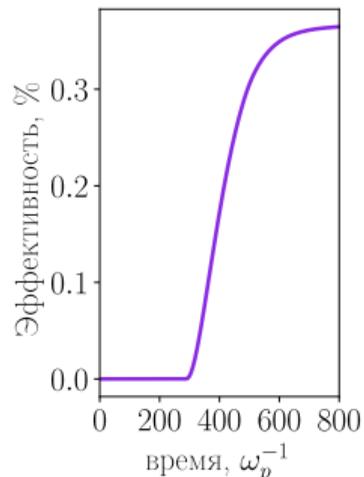
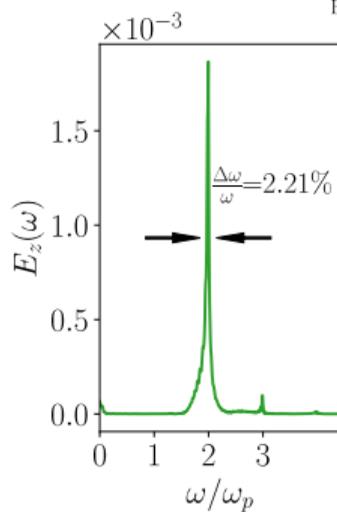
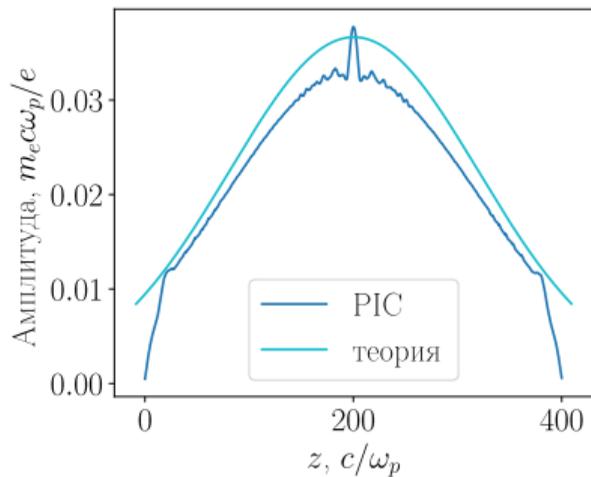
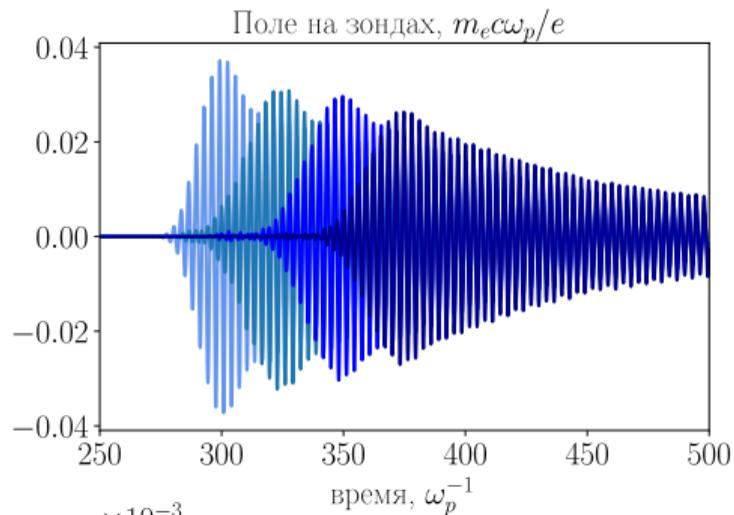
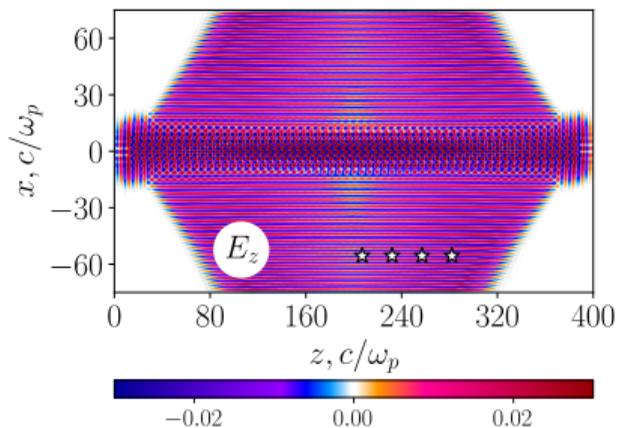


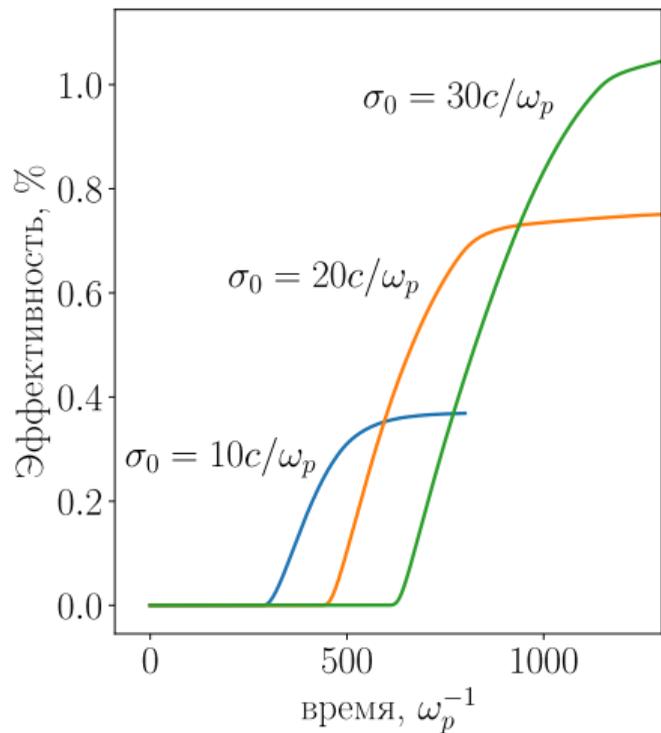
Сетка: для пондеромоторной силы  $\Delta x = \Delta z = 0.05 c/\omega_p$  и  $\Delta t = 0.025\omega_p^{-1}$ ;  
для реального лазера  $\Delta x = \Delta z = 0.01 c/\omega_p$  и  $\Delta t = 0.005\omega_p^{-1}$



Реальные лазеры

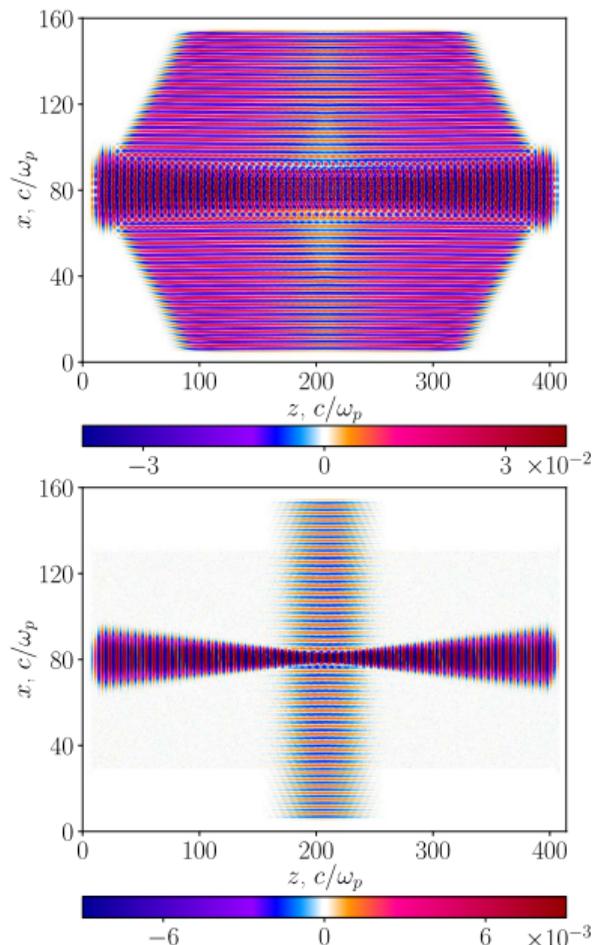






Эффективность как отношение энергии излучения к энергии лазерной системы

$$E_L = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} a_0^2 \omega_0^2 \tau \sigma_0,$$

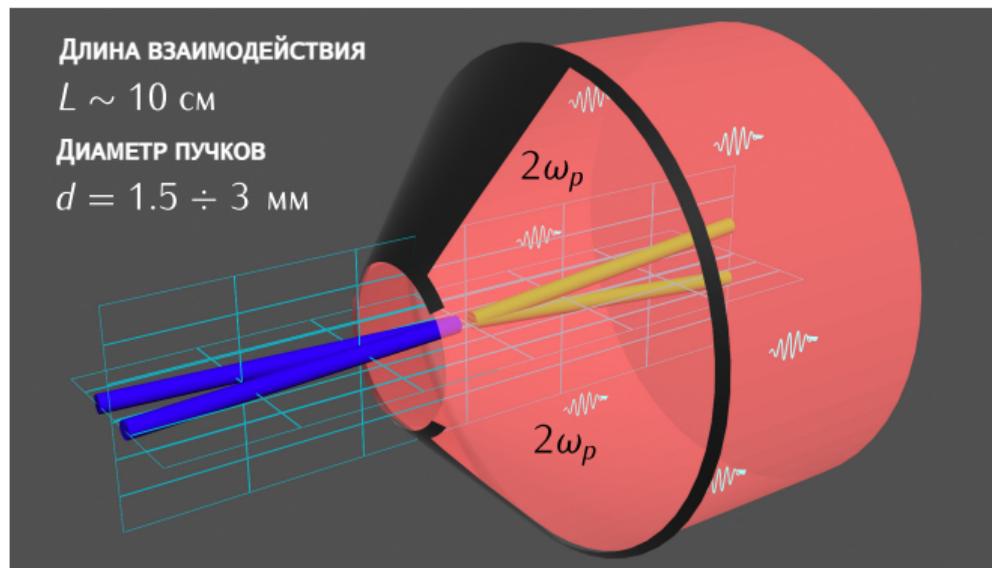




4 канала лазерной системы XCELS  
с суммарной энергией 1.5 кДж и  
 $\lambda_0 = 910$  нм

Хазанов Е. А. и др. Квантовая  
электроника, 53(2), 95-122.

Kostyukov I. et al. Bull. Lebedev Phys.  
Inst. 51, S653–S680



При плотности  $n_0 = 10^{17}$  см<sup>-3</sup> генерация излучения на частоте 5.7 ТГц. Длительность импульсов  $\tau \sim \pi/\omega_p = 140$  фс, угол  $\alpha = 1^\circ$ . При эффективности конверсии  $\sim 1\%$  энергия излучения в импульсе достигает 15 Дж при длительности 3–5 пс.



1. Timofeev I. V. et al. *Simulations of electromagnetic emission from colliding laser wakefields* // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 62. – №. 4. – С. 045017.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab74e6>
2. Timofeev I. V. et al. *Optimal synchronization of laser pulses in THz generation scheme with colliding plasma wakes* // Physics of Plasmas. – 2021. – Т. 28. – №. 1.  
<https://doi.org/10.1063/5.0029848>
3. Volchok E. et al. *Electromagnetic emission due to nonlinear interaction of laser wakefields colliding in plasma at an oblique angle* // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2021. – Т. 63. – №. 4. – С. 045001. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abdcdb>
4. Волчок Е. П. и др. *Генерация узкополосного ТГц излучения за счёт столкновения в плазме лазерных кильватерных волн с мелкомасштабной поперечной структурой* // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. – №. 3. – С. 272-277.  
<https://doi.org/10.3103/S106833562319017X>
5. Volchok E. et al. *Highly efficient multi-cycle terahertz radiation driven by counter-propagating modulated wakefields in a homogeneous plasma* – направлено в Physics of Plasmas.

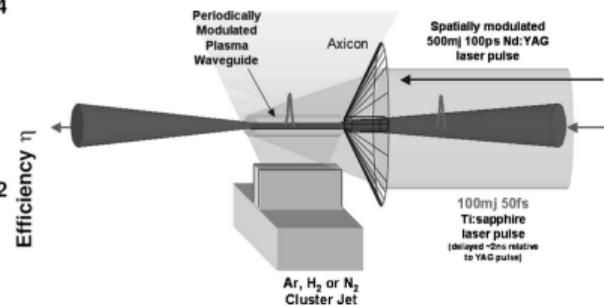
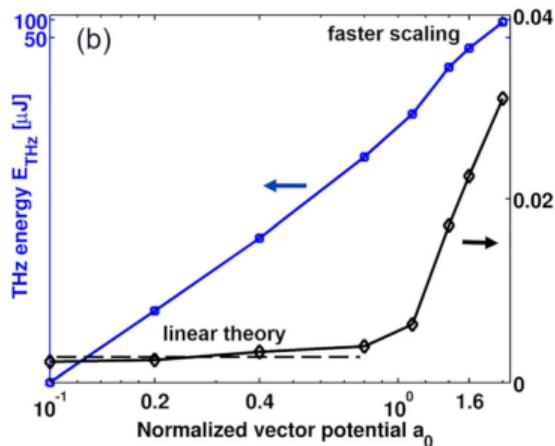
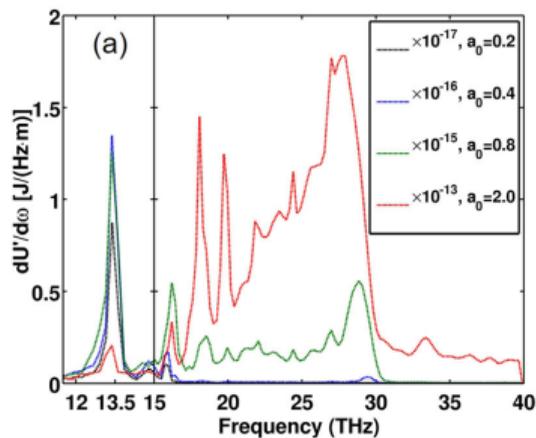
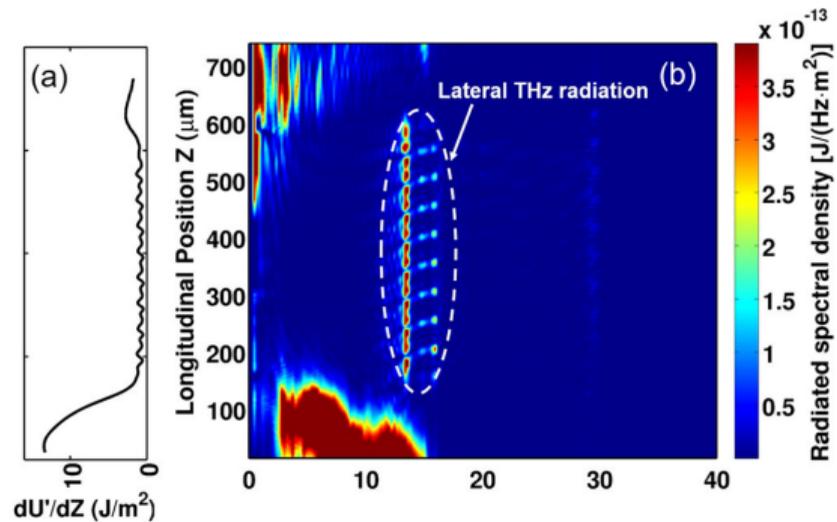
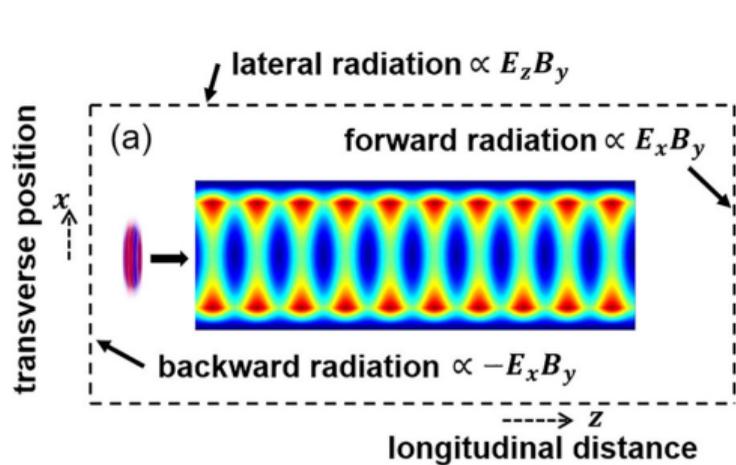
**Спасибо за внимание!**

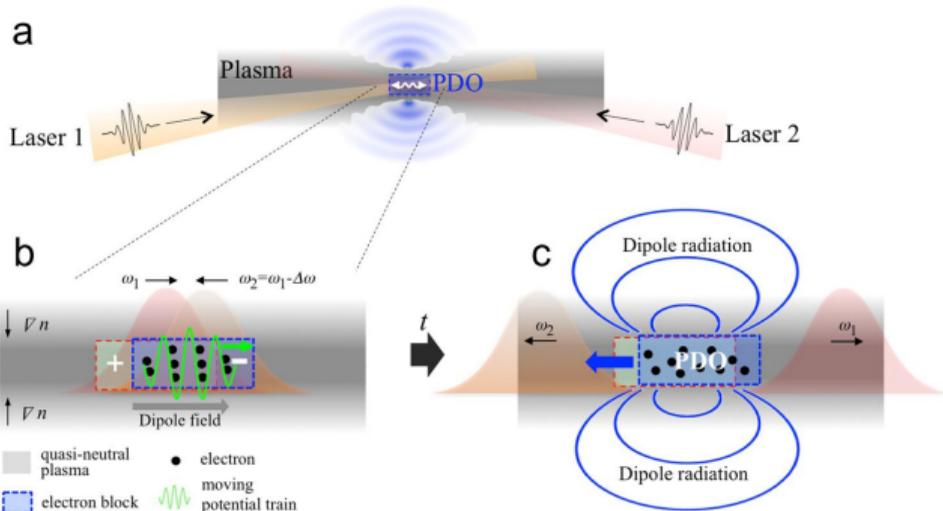


## Обезразмеривающие коэффициенты

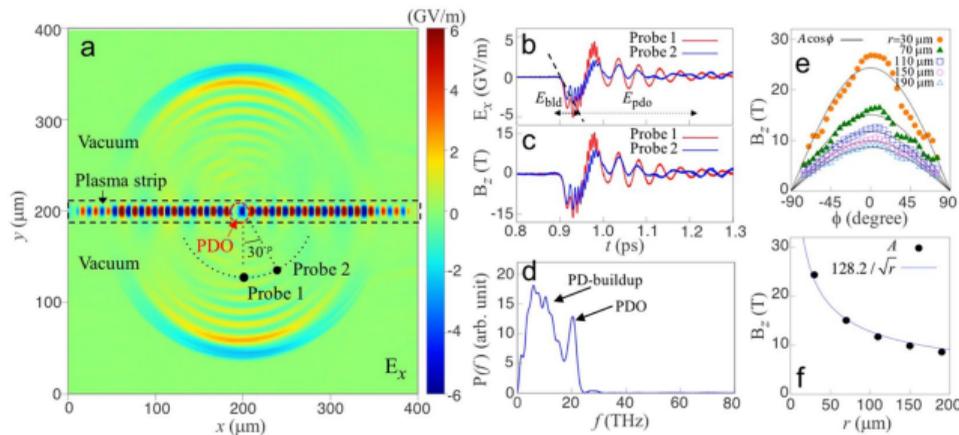
---

- ▶ Электронная и ионная плотности плазмы нормированы на среднее значение однородной плотности  $n_0$  (в начальный момент времени  $n_e = n_i = n_0$ );
- ▶ пространственные масштабы представлены в единицах длины плазменной волны  $c/\omega_p$ ;
- ▶ временные масштабы – в  $\omega_p^{-1}$ ;
- ▶ скорости определены в единицах скорости света;
- ▶ электрические и магнитные поля измеряются в единицах  $E_0 = m_e c \omega_p / e \approx 96 \sqrt{n_0 (\text{см}^{-3})}$  [В/м];
- ▶ скалярные и векторные потенциалы - в  $m_e c^2 / e$ .





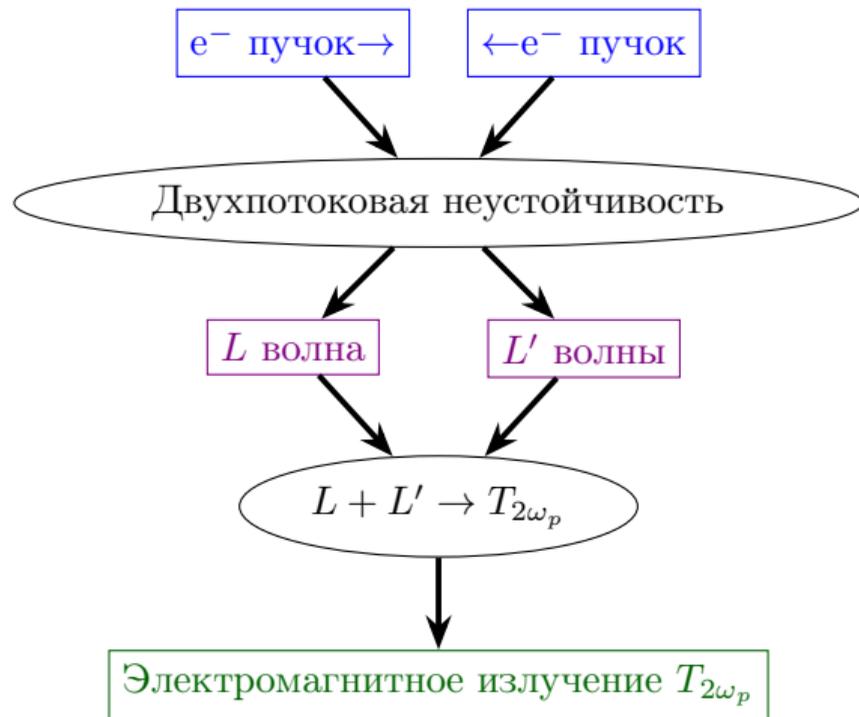
- встречные лазерные импульсы с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ;
- в области перекрытия электроны захватываются полем стоячей волны
- после ухода волны остаётся возмущение плотности, которое совершает колебания на частоте  $\omega_p$
- формируется пространственно локализованный диполь



Kwon, K.B. et al. Sci Rep 8, 145

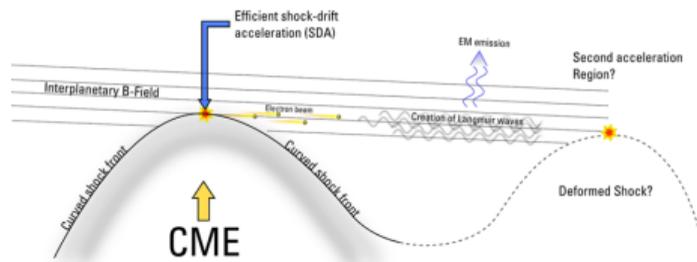


# Встречные пучки во всплесках II типа

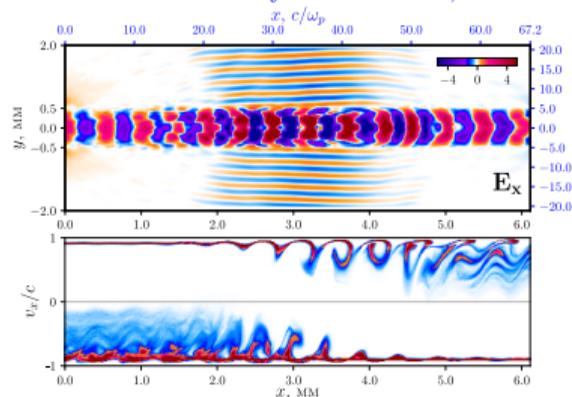


Встречные потоки ускоренных электронов могут образовываться на искривлённом фронте ударной волны.

Ganse, U. et al. *Sol Phys* 280, 551–560

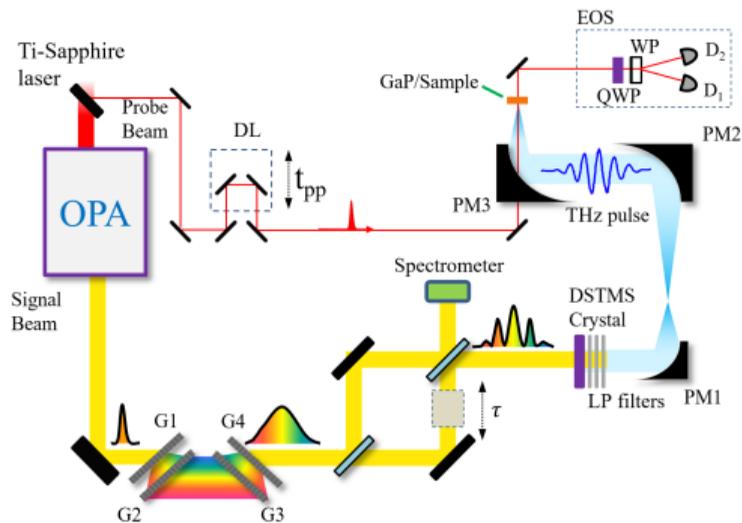


Annenkov et al. *Phys. Plasmas* 25, 113110

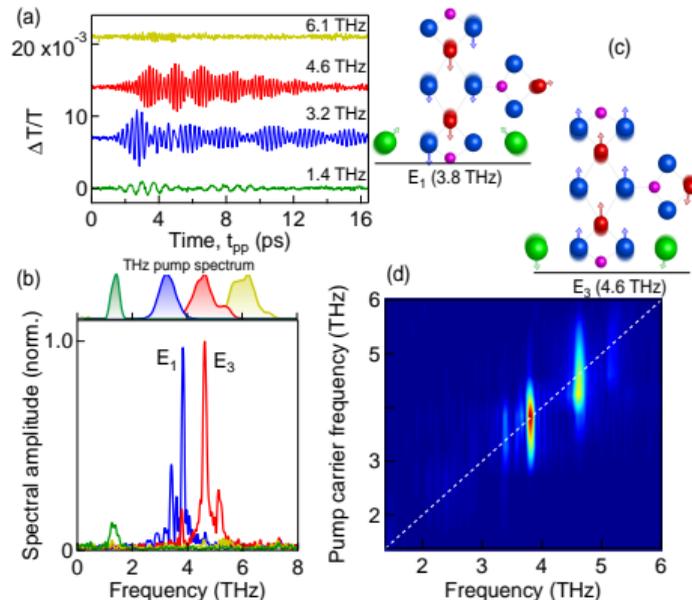




# Возбуждение фоновых мод кристаллов



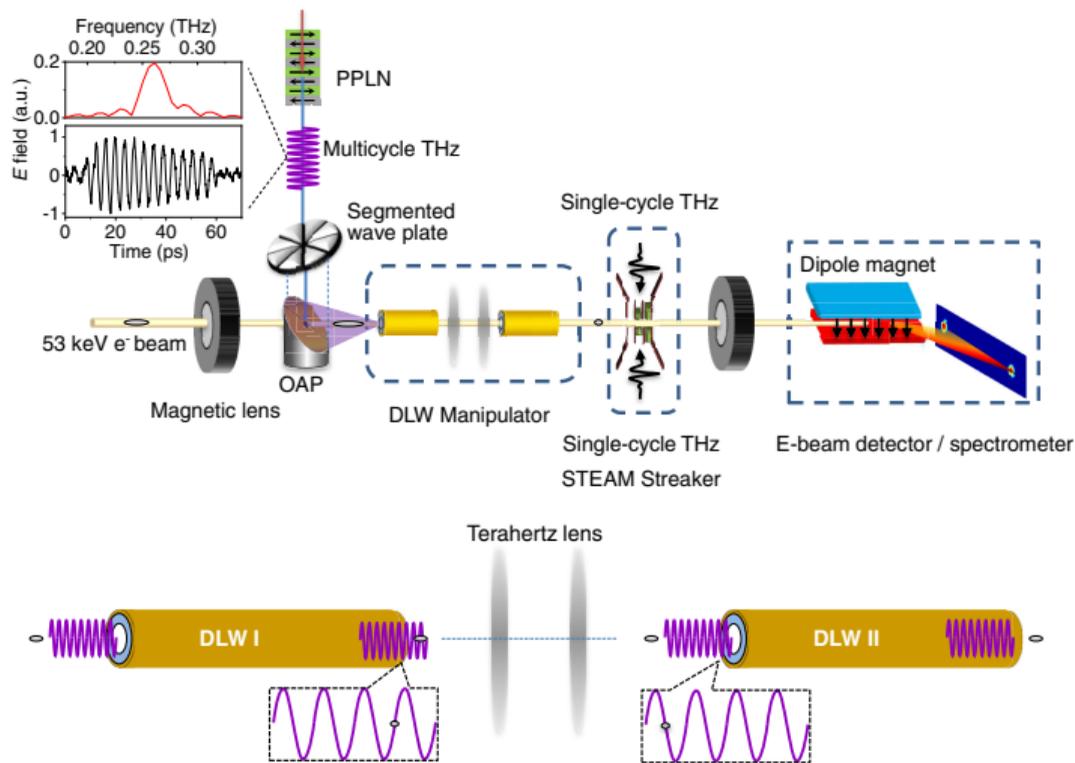
Оптическое выпрямление модулированного по времени лазерного импульса в органическом DSTMS кристалле → импульсы в диапазоне 0.5 – 6.5 ТГц с  $E_{\text{THz}}$  до 410 кВ/см и энергией до 0.5 мкДж.



Возбуждение коллективных колебаний кристаллической решётки  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  на частотах 3.8 и 4.3 ТГц.



# Ускорение электронов ТГц импульсами



## Эксперимент:

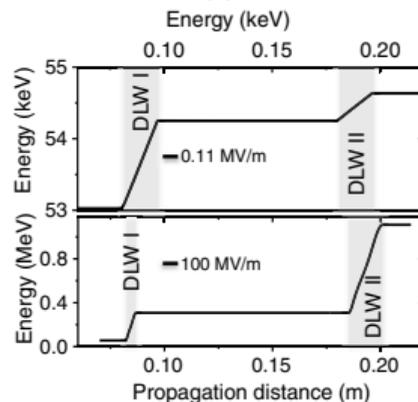
длина взаимодействия 3 см, ускорение на 1.6 кэВ ТГц-импульсом 20 нДж, 0.11 МВ/м.

## Моделирование:

Электроны с энергией 55 кэВ могут быть ускорены до 300 кэВ на 1 м этапе и до энергии >1 МэВ на 2м импульсом с суб-мДж, 100 МВ/м.

Zhang D. et al. *Phys. Rev. X* 10, 011067

He X. et al. *Optic. Lett.*, 50(6), 2017-2020





# ЛСЭ NovoFEL (Новосибирск)

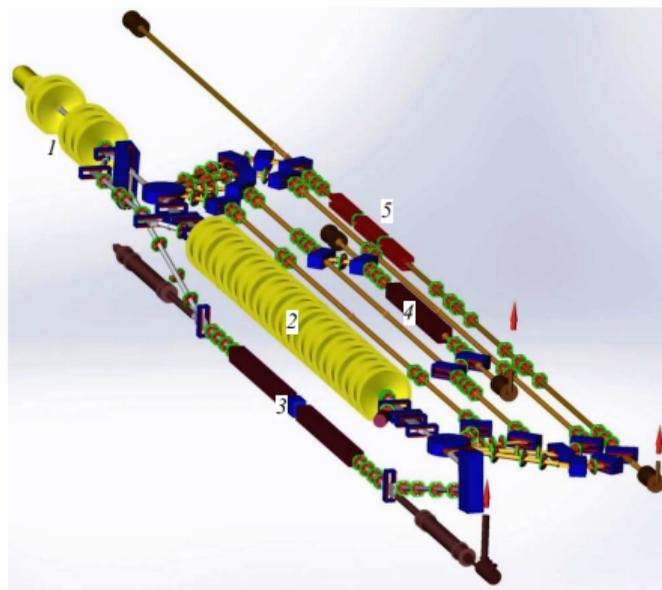


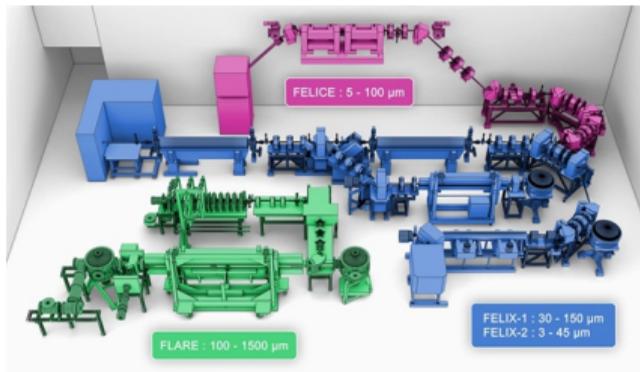
Figure: 1-инжектор, 2-основные ускоряющие резонаторы, 3-ондулятор первого ЛСЭ, 4-ондулятор второго ЛСЭ, 5-ондулятор третьего ЛСЭ.

Параметры \ Диапазон, год запуска	Терагерцовый, 2003 г.	Далёкий инфракрасный, 2009 г.	Инфракрасный, 2015 г.
Длина волны, мкм	90–240	37–80	8–11
Ширина спектра (на полувысоте), %	0,2–2,0	0,2–1	0,1–1
Максимальная средняя мощность, кВт	0,5	0,5	0,1
Максимальная пиковая мощность, МВт	0,5	2,0	5
Длительность импульса, пс	30–120	20–40	10–20
Частота следования импульсов, МГц	5,6	7,5	3,8

Figure: Параметры ЛСЭ.



# ЛСЭ Felix (Нидерланды)



	FELIX:	FLARE	FELICE:
энергия $e^-$	50/45-15 МэВ	15-10 МэВ	50/45-18 МэВ
спектральный диапазон	2.7-150 мкм	100-1500 мкм	5-100 мкм
	$3600-66 \text{ см}^{-1}$	$100-6 \text{ см}^{-1}$	$2000-100 \text{ см}^{-1}$
	120-2 ТГц 450-8 мэВ	3-0.25 ТГц 12-0.75 мэВ	60-3 ТГц 250-12 мэВ
Структура импульса	микро/макро импульс		
Частота повторения	25МГц/ 1ГГц@10Гц	3ГГц@10Гц	16МГц/ 1ГГц@10Гц
Энергия микроимпульса	1-20 мкДж	$\approx 5 \text{ мкДж}$	макс. 1 мДж
Энергия макроимпульса	$\leq 100 \text{ мДж}@1 \text{ ГГц}$	$\leq 100 \text{ мДж}@3 \text{ ГГц}$	макс. 5Дж@1ГГц
Пиковая мощность	$\leq 100 \text{ МВт}$	$\leq 10 \text{ МВт}$	$\leq 5 \text{ ГВт}$
Поляризация	линейная		
Спектральная ширина	0.2-5%	$\leq 1\%$	0.4-3%

TABLE I. Simulated wave lifetimes  $t_{s*}$  for two considered laser pulses ( $s = 1$  and 2) in various plasmas; maximum delays  $t_D = t_{1*} - t_{2*}$  between the pulses.

Plasma	$t_{1*}$ , ps ( $\omega_p t_{1*}$ )	$t_{2*}$ , ps ( $\omega_p t_{2*}$ )	$t_D$ , ps
H <sup>+</sup>	4.3 (383.6)	2.0 (180.3)	2.3
He <sup>2+</sup>	5.5 (487.4)	2.6 (230.3)	2.8
N <sup>5+</sup>	5.9 (528.2)	2.9 (261.2)	3.0

$$t_* \propto m_i^{1/3}.$$

Spitsyn et al. Phys. Plasmas 25, 103103

- модуляция ионной плотности приводит к включению дополнительного механизма излучения, что повышает эффективность
- эта же модуляция приводит к уменьшению времени жизни кильватерной волны
- рабочим газом выбран **гелий**



# Модель ионизации

Тунельная ионизация  $E \ll E_{cr} = E_a k^4 / (16Z)$

$$W_{TI} = \omega_a k_s^2 C_s \left( \frac{2}{F_s} \right)^{2n_s - 1} \exp \left( -\frac{2}{3F_s} \right),$$

$$k_s = \sqrt{\frac{I_s}{I_H}}, \quad C_s = \frac{2^{2n_s}}{n_s \Gamma(2n_s)}, \quad F_s = \frac{E}{k_s^3 E_a},$$

[Ammosov M.V. et al. High intensity laser processes, 664, 138-141.](#)

Модель Бауэра-Мюлсера  $E \sim E_{cr}$

$$W_{BM} \approx 2.4 \frac{\omega_a}{k_s^4} \left( \frac{E}{E_a} \right)^2.$$

[D. Bauer, P. Mulser Phys. Rev. A 59, 569](#)

Надбарьерная ионизация  $E \gg E_{cr}$

$$W_{BSI} \approx 0.8 \frac{\omega_a}{k_s} \left( \frac{E}{E_a} \right).$$

[Kostyukov I. Y., Golovanov A. A. Field ionization rate for PIC codes.](#)

Вероятность ионизации

$$P_s = 1 - \exp \left( -\frac{1}{\omega_p} \int_{t_0}^t W_s(t') dt' \right),$$

скорость ионизации

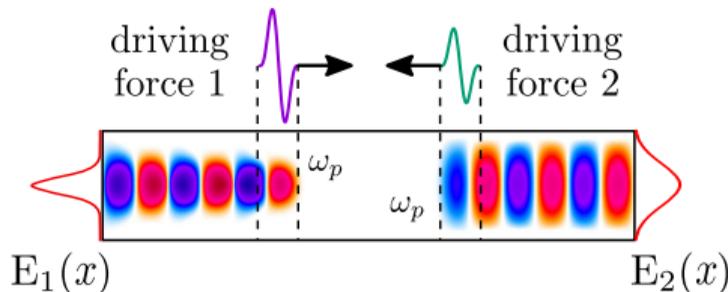
$$W_s(E) = \begin{cases} W_{TI}(E), & E < E_1 \\ W_{BM}(E), & E_1 < E < E_2 \\ W_{BSI}(E), & E > E_2, \end{cases}$$

где  $E_1$  и  $E_2$  определяются из уравнений  $W_{TI}(E_1) = W_{BM}(E_1)$  и  $W_{BM}(E_2) = W_{BSI}(E_2)$ .

В начальный момент времени  $n_a/n_0 = 0.5$ . Когда происходит ионизация, на месте атома возникают электрон и однократно заряженный ион. Энергия возникающих электронов с равной вероятностью принимает значение в диапазоне  $(0, I_1)$ .



## Излучение на $2\omega_p$

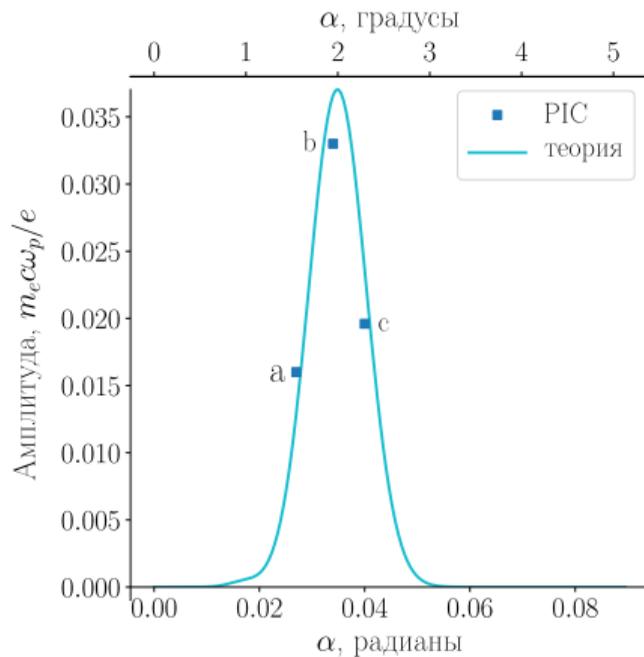
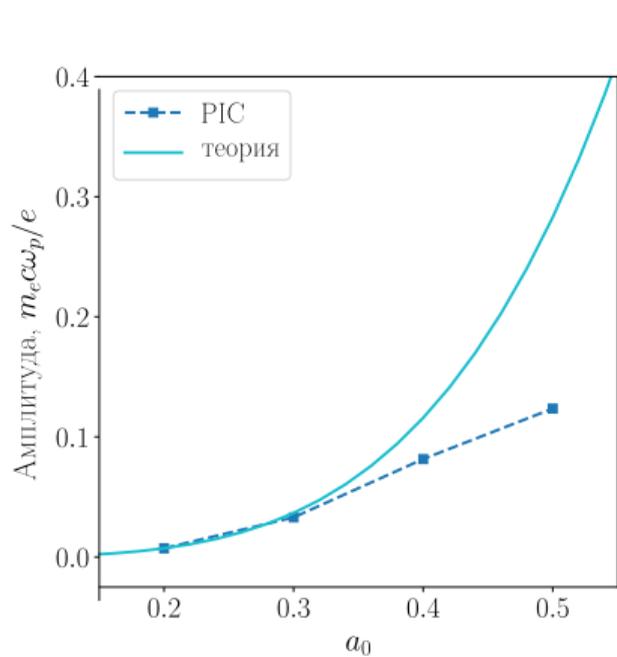


$$\mathcal{J} = \frac{k}{4} (\Phi_1 \Delta_{\perp} \Phi_2 - \Phi_2 \Delta_{\perp} \Phi_1)$$

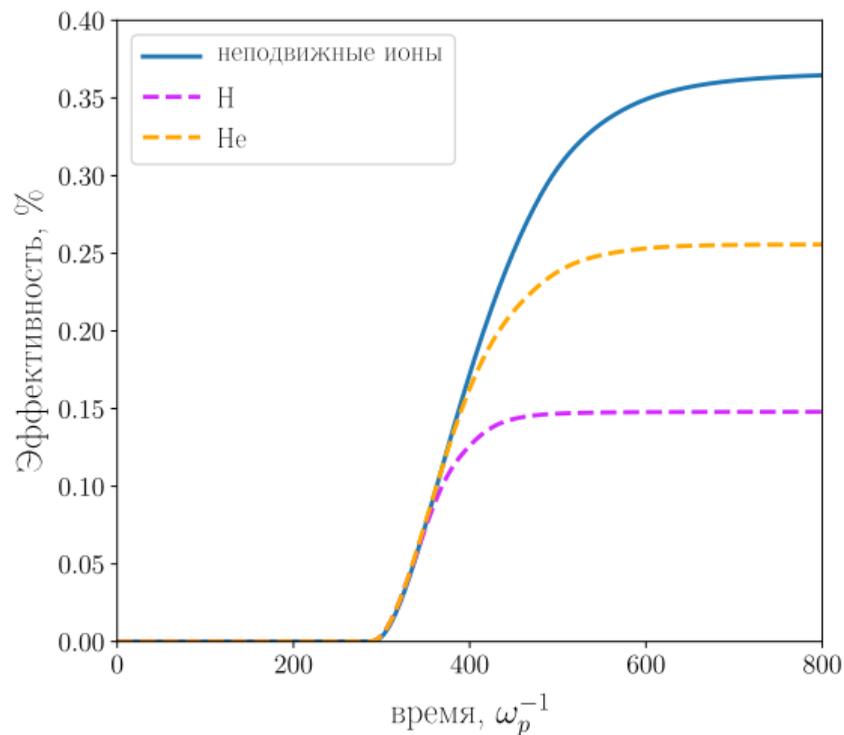
Амплитуда возбуждаемой волны в плазме

$$\mathcal{E}_0 = \frac{2}{\sqrt{\cos^2(\sqrt{3}l) + 3}} \left| \int_{-l}^l \mathcal{J}(x) \cos(\sqrt{3}x) dx \right|.$$

Полная мощность излучения  $P = \sigma_y \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}_0^2(z) dz$ .



- Согласие с теорией при малых  $a_0 < 0.3$ ;
- Угол  $\alpha = \arcsin(\sqrt{3}/(2\omega_0))$  сведения лазерных импульсов для создания модуляции соответствует оптимуму.



Сравнение эффективности излучения в расчётах с неподвижными ионами и с ионами водорода и гелия.