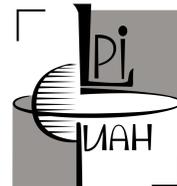




VNIIA  
ROSATOM



# Оптимизация синхротронного излучения в задаче распространения лазерного импульса в режиме релятивистского самозахвата

О.Е. Вайс, М. Г. Лобок, В. Ю. Быченков

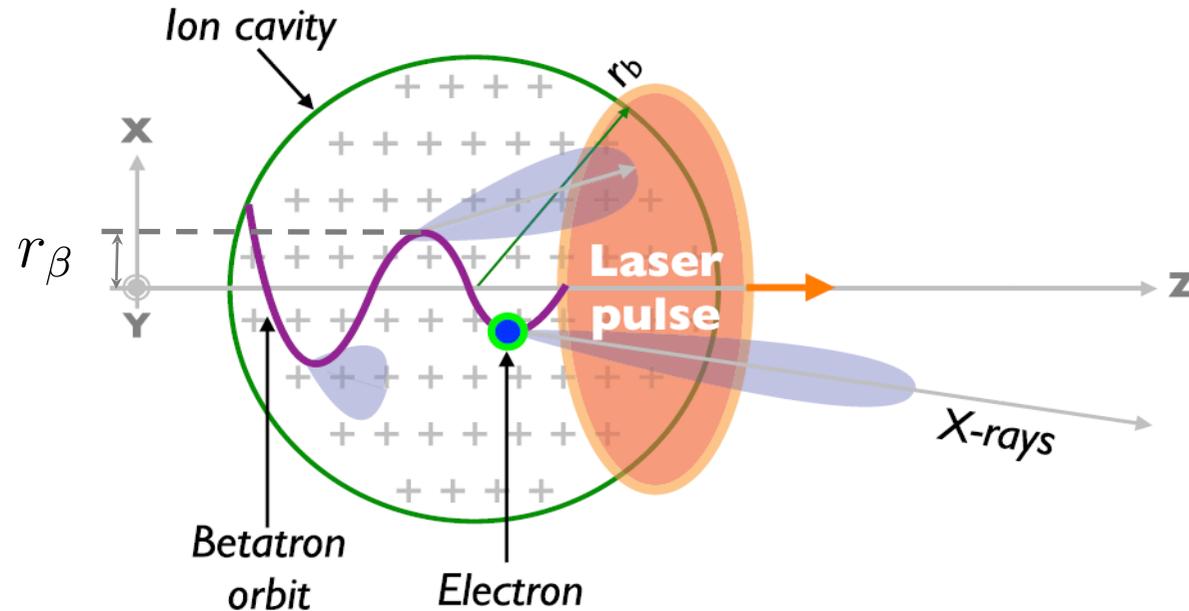
XVII Международная конференция  
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

19 - 23 мая 2025 г., г. Снежинск

21.05.2025

# Генерация синхротронного (бетатронного) излучения при лазерно-плазменном ускорении

Бетатронные осцилляции электронов в поперечных полях плазменной полости при ускорении частиц ее продольным полем → генерация синхротронного излучения



[S. Corde, et al Rev. Mod. Phys. **85**, 1]

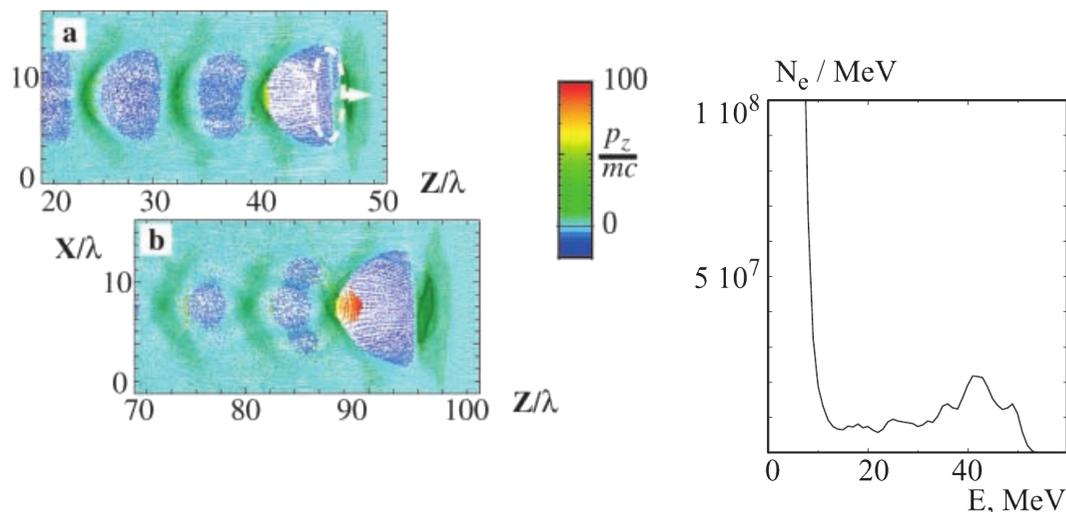
спектрально-угловое распределение синхротронного излучения:

$$\frac{d^2W}{d\Omega d\omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[\mathbf{n} \times [(\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta}) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}]]}{(1 - \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{n})^2} e^{i\omega\{t - \mathbf{n} \cdot \mathbf{r}(t)/c\}} dt \right|^2,$$

# Лазерно-плазменное ускорение электронов

## Кильватерное ускорение (LWFA)

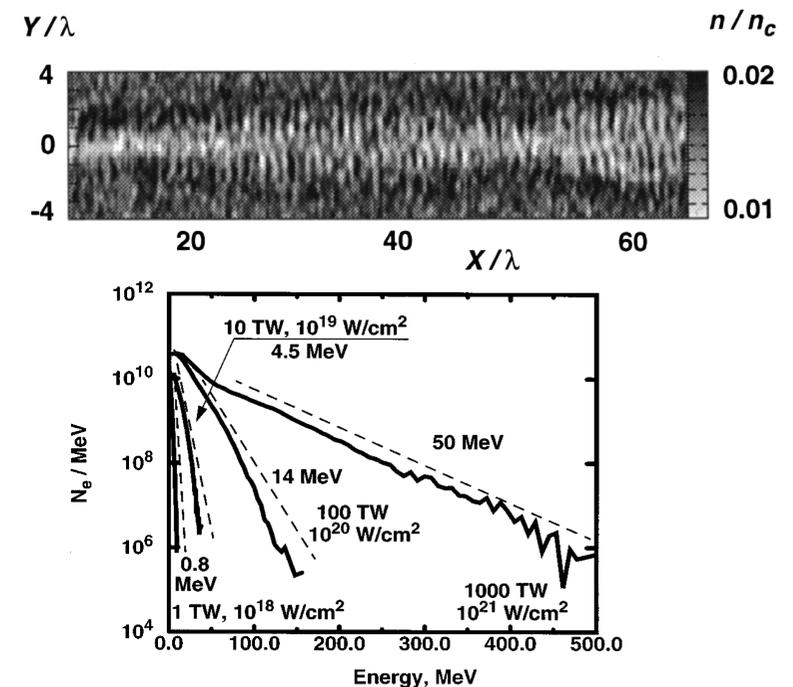
- Распространение лазерного импульса (ЛИ) в низкоплотной мишени
- $L < \lambda_p$  (ЛИ короче плазменной волны)
- моноэнергетичный пучок электронов (пКл)



[A. Pukhov, and J. Meyer-ter-Vehn, Appl. Phys. B 74, 355-361 (2002)]

## Прямое лазерное ускорение (DLA)

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



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

# Оценки для критической частоты синхротронного излучения

связь величин при лазерно-плазменном ускорении:

$$\rho \approx (k_\beta^2 r_\beta)^{-1}$$

$$\omega_\beta = \omega_p / \sqrt{2\gamma}$$

$$k_\beta r_\beta = v_\perp / c \approx \theta$$

критическая частота синхротронного излучения:

$$\omega_c = 3\gamma^3 (c/\rho)$$

(оценка по результатам эксперимента)

(оценка по результатам PIC-расчета)

$$\frac{\omega_c}{\omega_l} = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n_e}{n_c}} \theta \gamma^{2.5}$$

$$\frac{\omega_c}{\omega_l} = 3.9 \gamma^2 \frac{r_\beta}{D} \sqrt{a_0 \frac{n_e}{n_c}}$$

“-” пузыря ( $c\tau \ll D$ ): малоплотная мишень, узконаправленное излучение

“-” DLA ( $c\tau \gg D$ ): небольшая доля высокоэнергетичных частиц

режим стабильного распространения импульса:

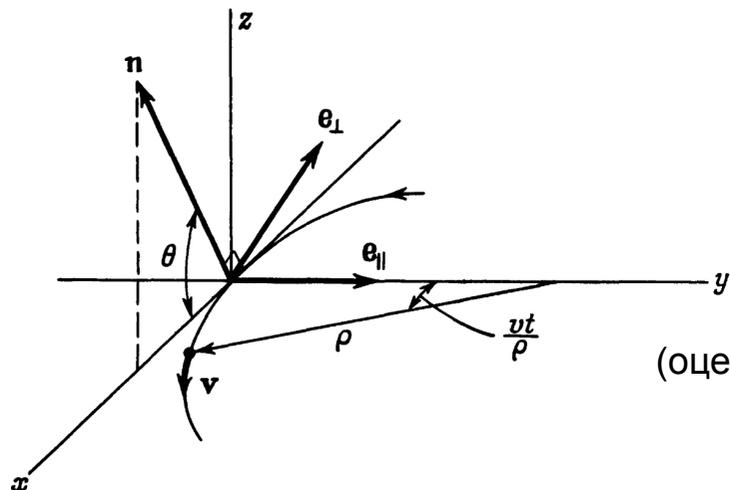
$$D \propto \sqrt{a_0/n_e}, c\tau \lesssim D$$

$$\gamma \propto a_0 D \tau \propto P_L^{1/2} \tau$$

$$\hbar\omega_c \propto P_L^{3/2} \left(\frac{r_\beta}{D}\right) \left(\frac{c\tau}{D}\right)^2$$

использование более плотных мишеней

режим лазерной пули ( $c\tau \approx D$ )



# Режим релятивистского самозахвата

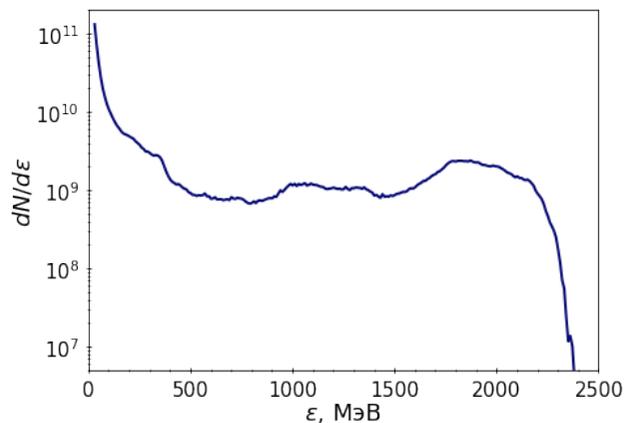
Условие согласования радиуса лазерного пучка, безразмерной амплитуды и плотности мишени:

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

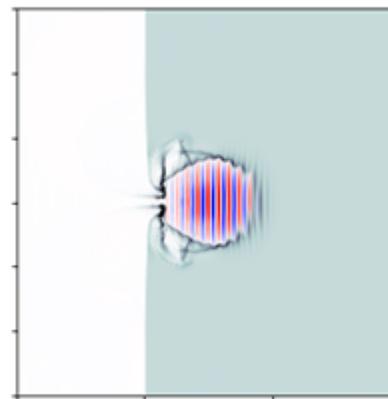
Дифракционная расходимость уравнивается релятивистской нелинейностью  $\rightarrow$  радиус лазерного пучка примерно сохраняется при его распространении на многие рэлеевские длины.

реализация режима в  
плотной плазме

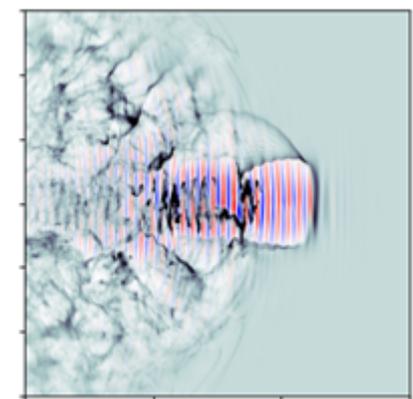
платообразный спектр  
электронов



лазерная пуля  
( $c\tau \approx D$ )



само модуляция  
лазерного импульса  
( $c\tau > 3D$ )



# Оптимизационные исследования по влиянию длительности лазерного импульса

Параметры лазерного импульса (Мультитера, НЦФМ):  $\lambda_l = 0.8$  мкм, 0.85 Дж

длительность лазерного импульса

40 фс:

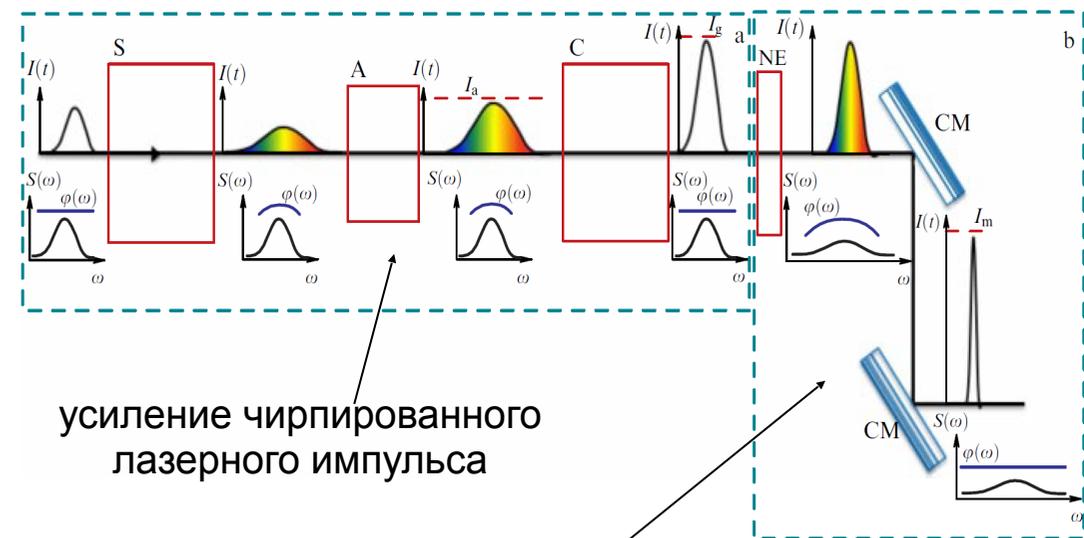
-  $D_F = 2.8$  мкм  
(само модуляция  
лазерного импульса)

-  $D_F = 5.7$  мкм  
( $\approx$  лазерная пуля),  
малый заряд  
электронов [O.E. Vais et al.,  
JETP Lett. 118, 875 (2023)] -  
не оптимально

10 фс:

-  $D_F = 2.8$  мкм  
(лазерная пуля)

укорочение лазерных импульсов



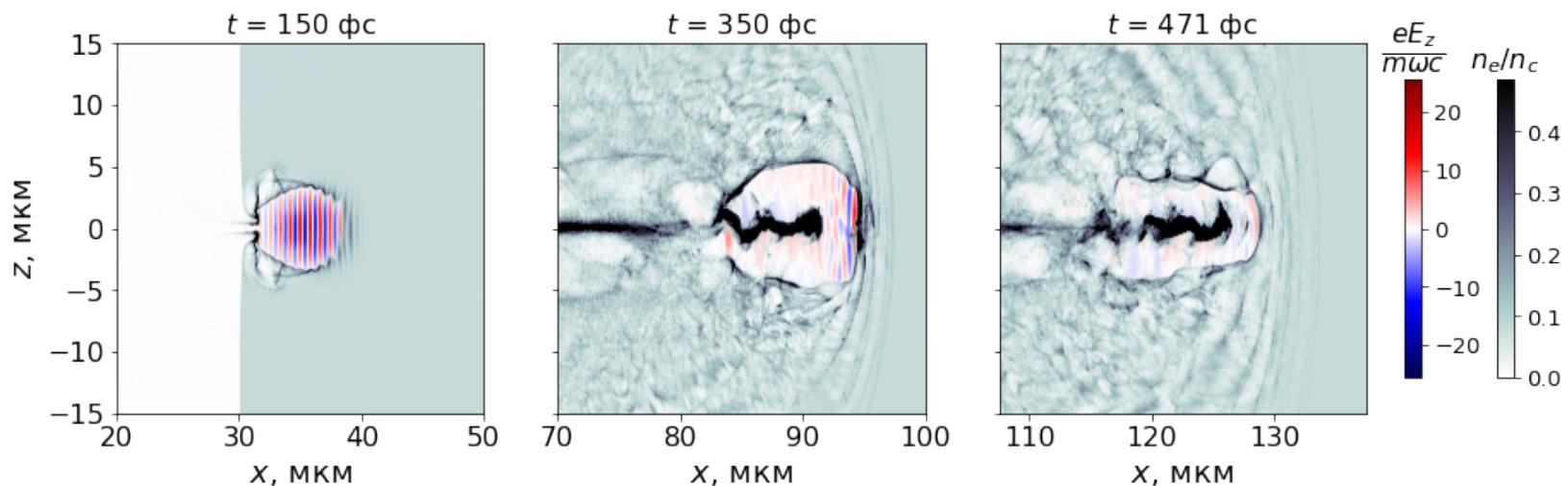
CafCA ("Compression after  
Compression Approach")

[E A Khazanov et al 2019 Phys.-Usp. 62 1096]

# Динамика лазерно-плазменной структуры

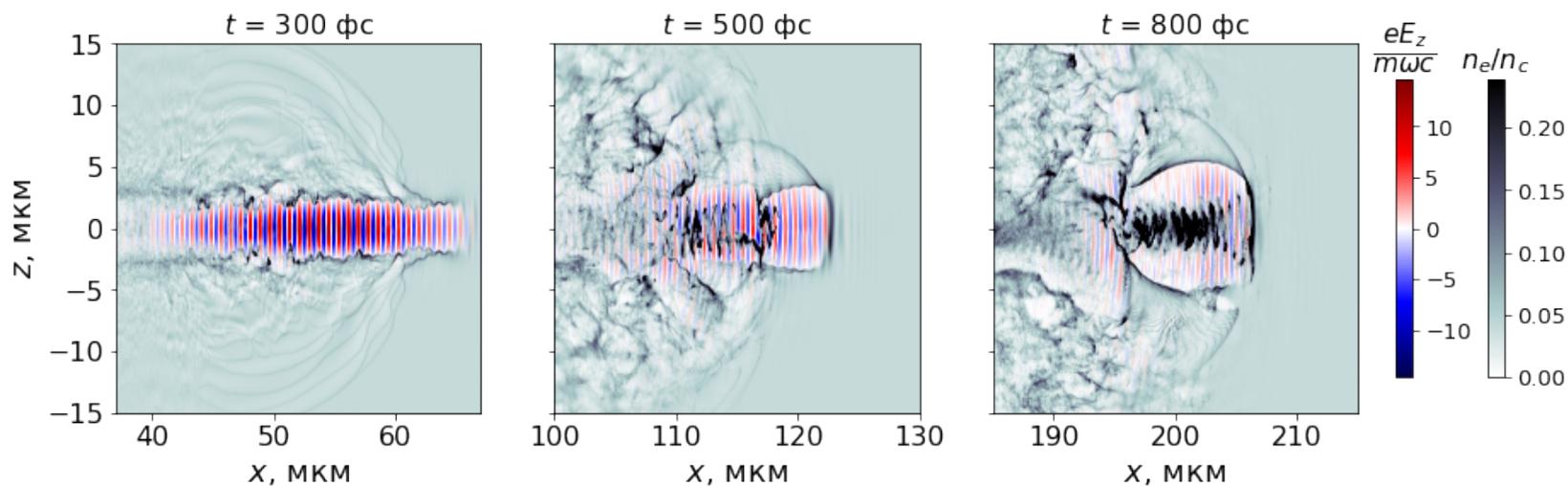
$\tau = 10\phi c$

лазерная  
пуля

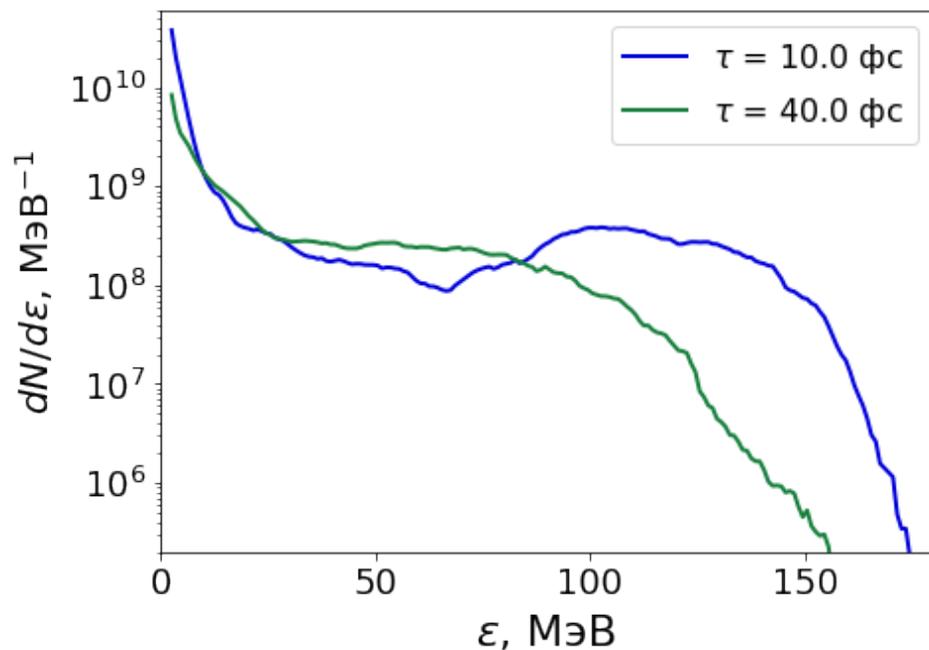


$\tau = 40\phi c$

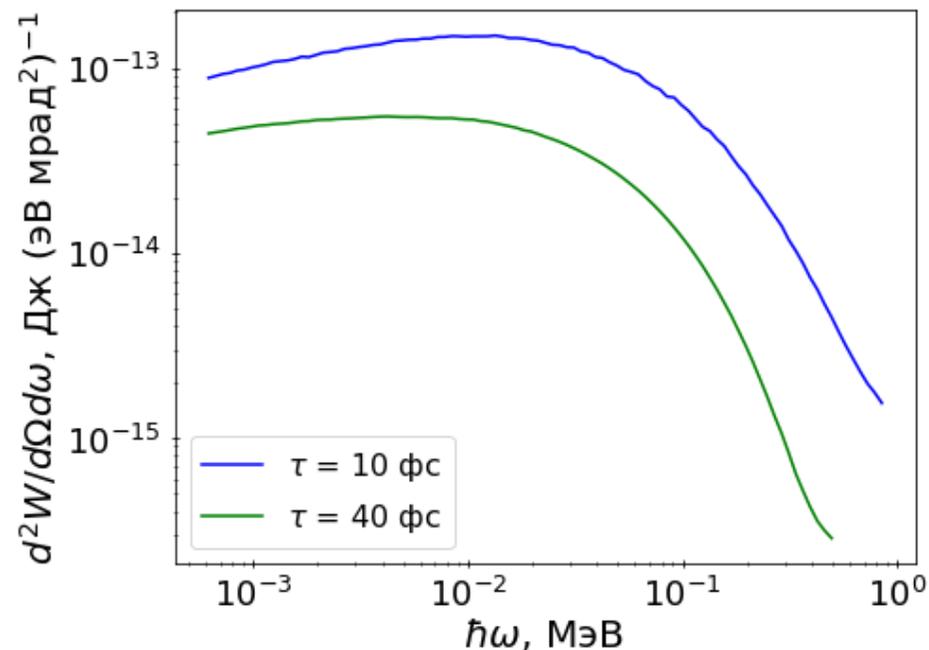
само  
модуляция  
лазерного  
импульса



спектры электронов



спектры фотонов ( $\varphi = 0, \vartheta = 0$ )



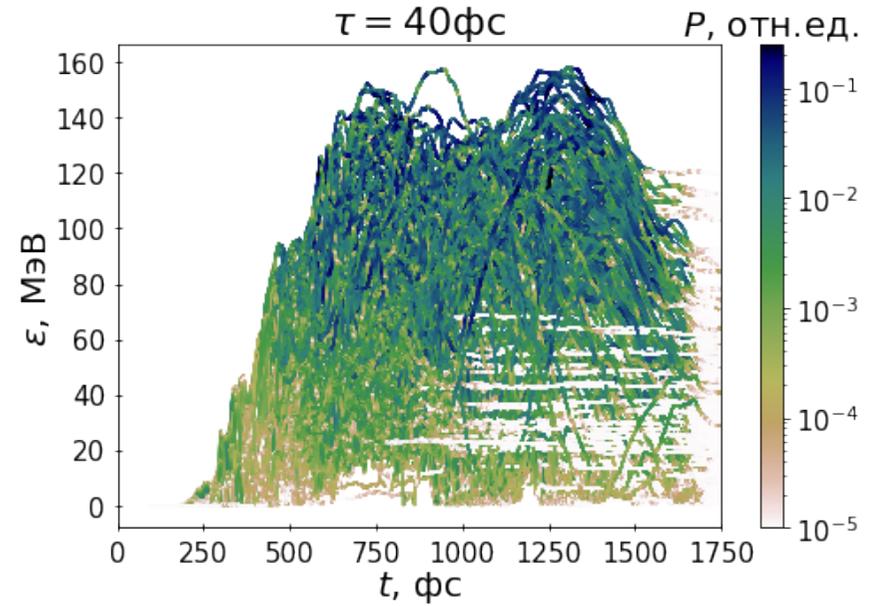
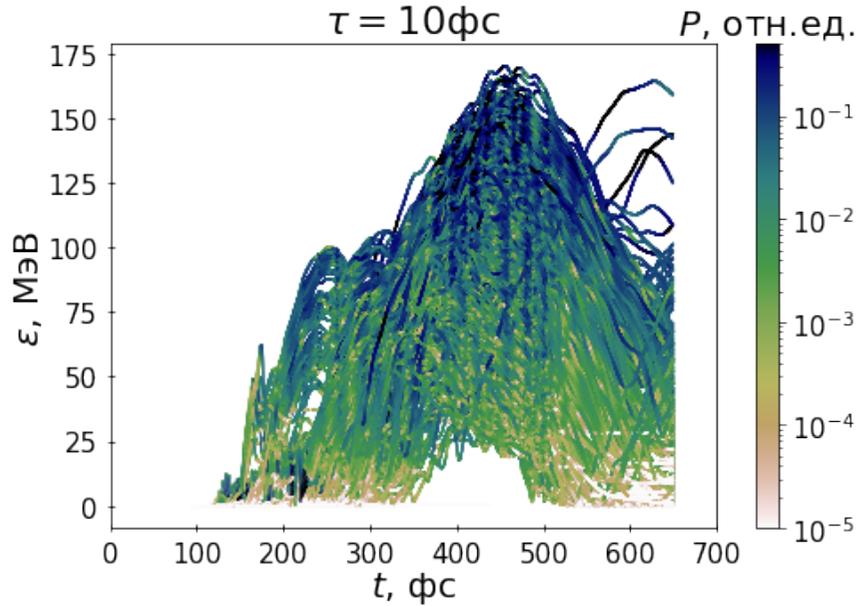
характеристики электронного пучка

$\tau$ , фс	$a_0$	$n_e/n_c$	$\langle \varepsilon_{>20\text{МэВ}} \rangle$	$Q_{>20\text{МэВ}}$	$W_{>20\text{МэВ}}$	$\hbar\omega_c$
10	20.6	0.097	<b>90 МэВ</b>	<b>4.7 нКл</b>	<b>400 мДж</b>	<b>100 кэВ</b>
40	10.3	0.048	60 МэВ	3.2 нКл	183 мДж	50 кэВ

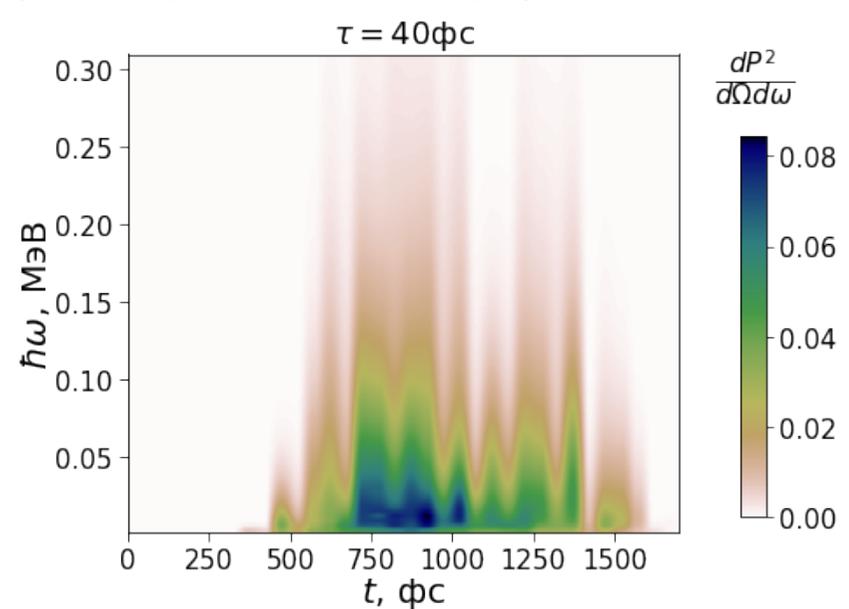
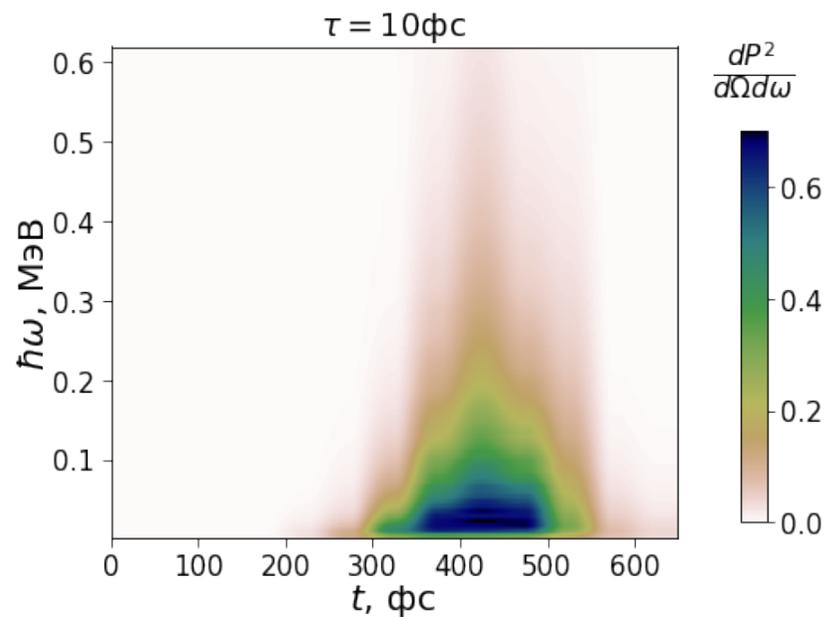
# Эволюция генерации синхротронного излучения



динамика энергии ускоренных электронов и мгновенная мощность излучения



временная зависимость спектров излучения [ $\text{Вт} (\text{эВ мрад}^2)^{-1}$ ], ( $\varphi = 0, \vartheta = 0$ )



# Энергетические характеристики излучения



	$\tau = 40$ фс	$\tau = 10$ фс
критическая частота	50 кэВ	100 кэВ
длительность генерации	1000 фс	250 фс
яркость [фот./с/мм <sup>2</sup> /мрад <sup>2</sup> /0.1%b.w.]	$10^{19}$ (100 кэВ)	$10^{20}$ (200 кэВ)
яркость [фот./с/мм <sup>2</sup> /мрад <sup>2</sup> /0.1%b.w.]	$10^{20}$ (10 кэВ)	$10^{21}$ (30 кэВ)
коэффициент конверсии	$3.5 \times 10^{-5}$	$15 \times 10^{-5}$

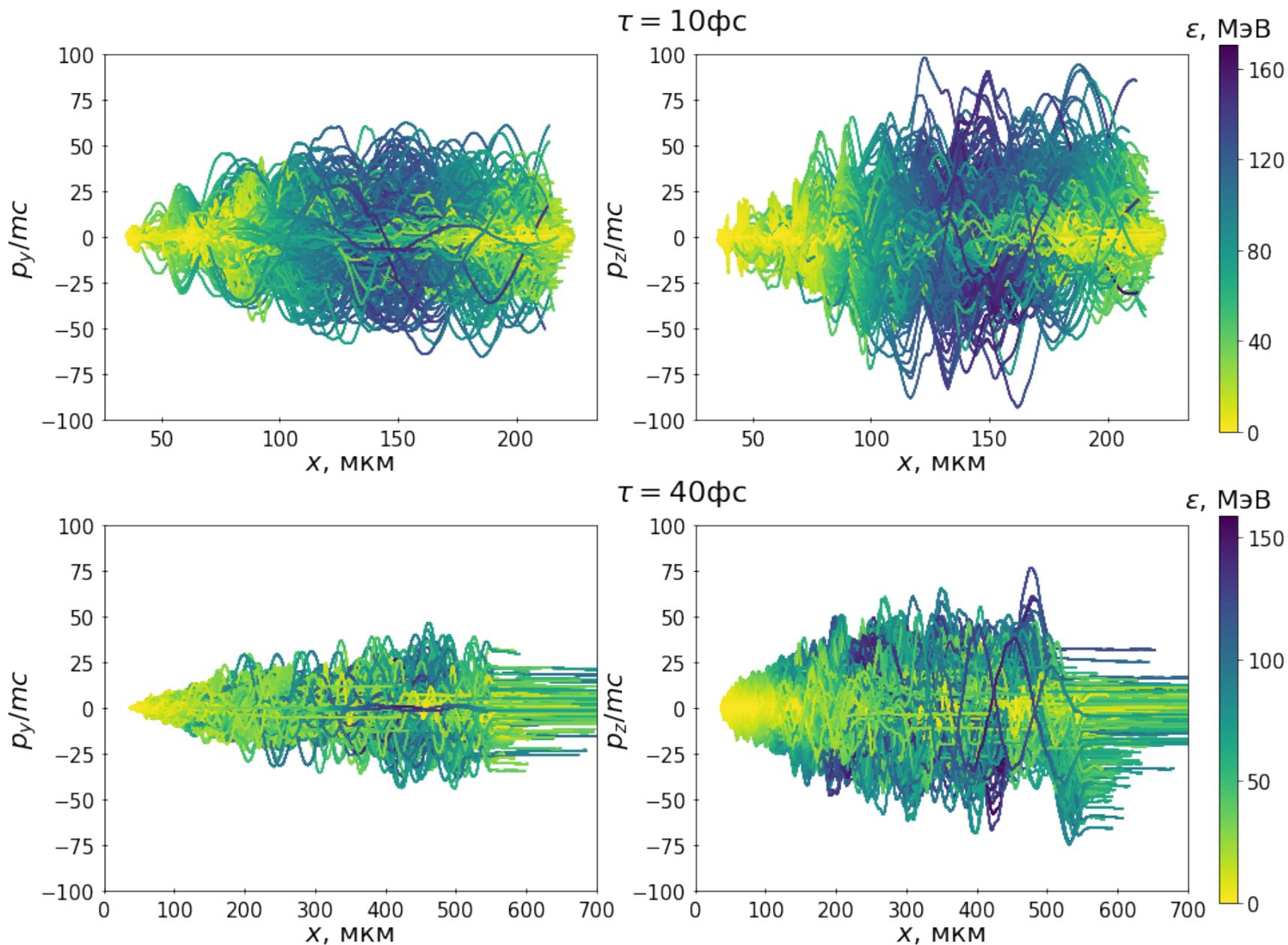
Полная энергия синхротронного излучения примерно в 4 раза выше для  $\tau = 10$  фс.

# Компоненты импульса частиц

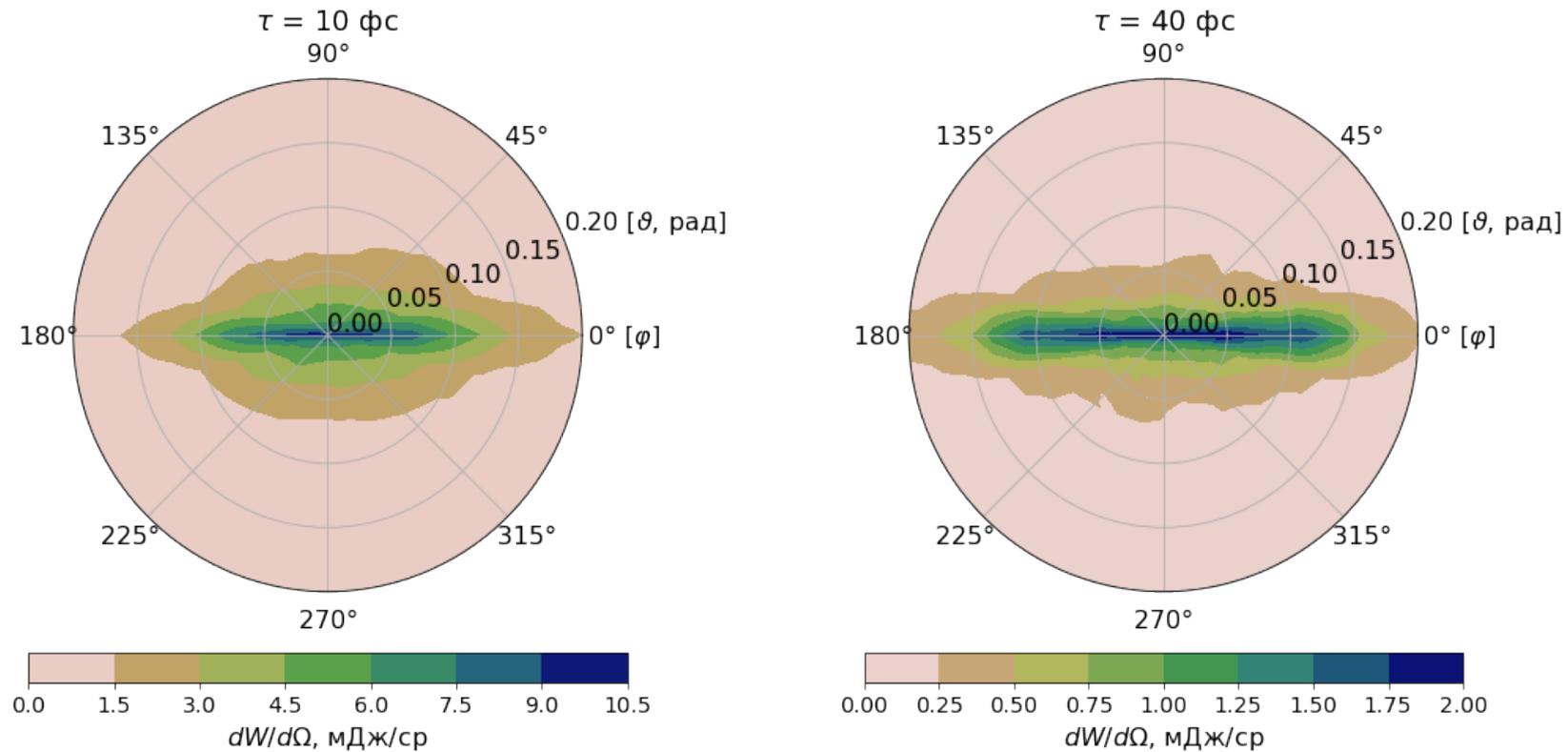


перпендикулярно поляризации ЛИ

вдоль поляризации ЛИ



# Угловое распределение энергии синхротронного излучения



распределение энергии между компонентами вторичного излучения

$$\zeta = \frac{I_z - I_y}{I_z + I_y}$$

для  $\tau = 10 \text{ фс}$ :  $\zeta \approx 0.74$

для  $\tau = 40 \text{ фс}$ :  $\zeta \approx 0.77$

$I_{y,z} = \frac{1}{T_{gen}} \iint E_{y,z}^2(t_l) dt_l dN$  – средняя интенсивность компоненты синхротронного излучения

# Сравнение с прошлыми результатами

$W_L/P_L$	$\tau$ , фс	$D_F$ , мкм	$a_0$	$n_e/n_c$	$\hbar\omega_c$	яркость*
190Дж / 7.2ПВт (XCELS) [1]	25	6.9	89	0.5	10 МэВ	$8 \times 10^{22}$
20Дж / 625ТВТ [2]	30	2.8	72	0.3	1 МэВ	$3 \times 10^{22}$
2.2Дж / 70ТВТ [2]	30	2.8	24	0.1	100 кэВ	$1.2 \times 10^{22}$
0.85Дж / ТВТ (MultiTera)	10	2.8	20.6	0.097	30 кэВ	$1.1 \times 10^{21}$
0.85Дж / 20ТВТ (MultiTera)	40	2.8	10.3	0.048	10 кэВ	$1.1 \times 10^{20}$

[1] Vais, O. E. et al. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 50(Suppl 7), S806-S814 (2023).

[2] Lobok, M. G. et al. Physical Review E, 104(5), L053201 (2021).

\* фот./с/мм<sup>2</sup>/мрад<sup>2</sup>/0.1%b.w

## Заключение

Было показано, что сжатие 0.85 Дж лазерного импульса с 40 до 10 фс приводит к следующим изменениям характеристик синхротронного излучения:

- значительному уменьшению времени генерации,
- небольшому уменьшению анизотропии,
- уширению спектра в  $\approx 2$  раза,
- $\approx 4$  кратное увеличение полной излучаемой энергии,
- увеличение яркости источника на порядок.

Таким образом, укорочение лазерного импульса оказывается оправданным с точки зрения генерации синхротронного излучения.

Результаты работы приняты для публикации в журнале Физика плазмы  
[*Физика плазмы* **51**, №4 (2025)]

**Спасибо за  
внимание**

