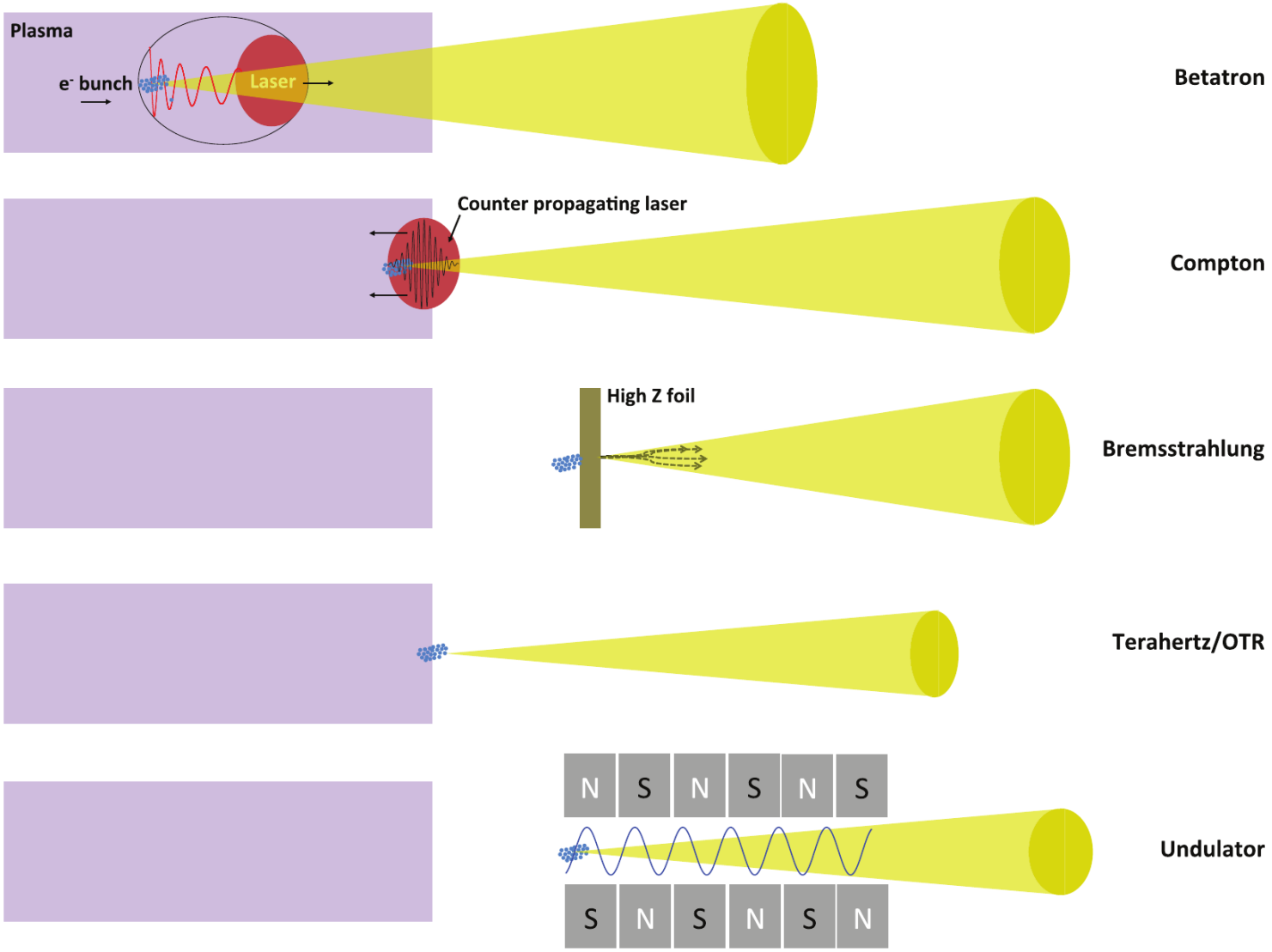
ГЕНЕРАЦИЯ ЖЕСТКОГО СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

О.Е. Вайс, М.Г. Лобок, В.Ю. Быченков

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

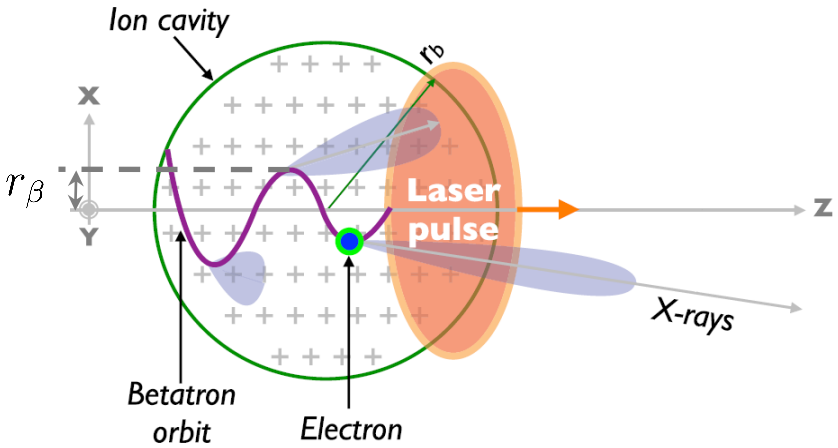
Генерация вторичного излучения при лазерно-плазменном ускорении электронов



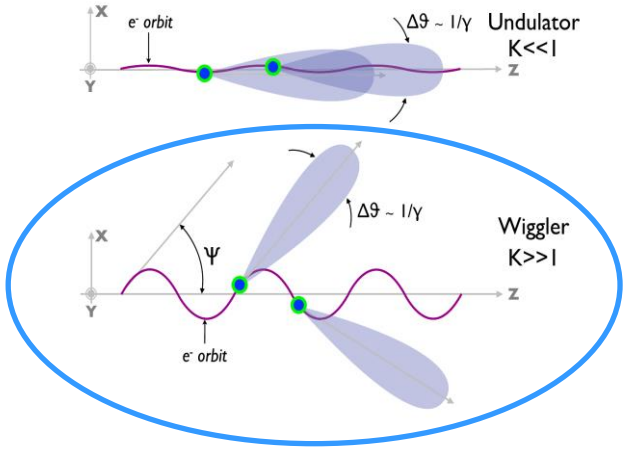
[F. Albert, A. G. R. Thomas, Plasma Phys. Control. Fusion 58 (2016) 103001]

Генерация бетатронного излучения в лазерно-плазменном ускорителе электронов

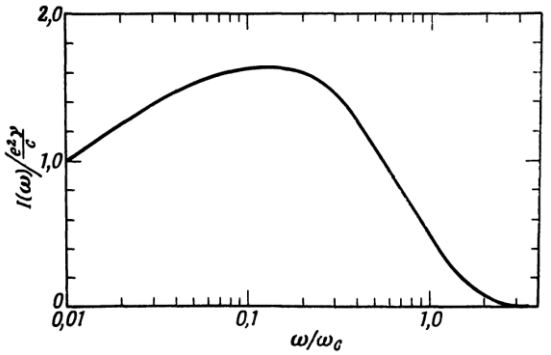
Бетатронные колебания электронов в поперечном поле плазменной мишени при ускорении частиц её продольным полем → генерация синхротронного излучения



[S. Corde, et al Rev. Mod. Phys. **85**, 1 (2013)]



спектр синхротронного излучения



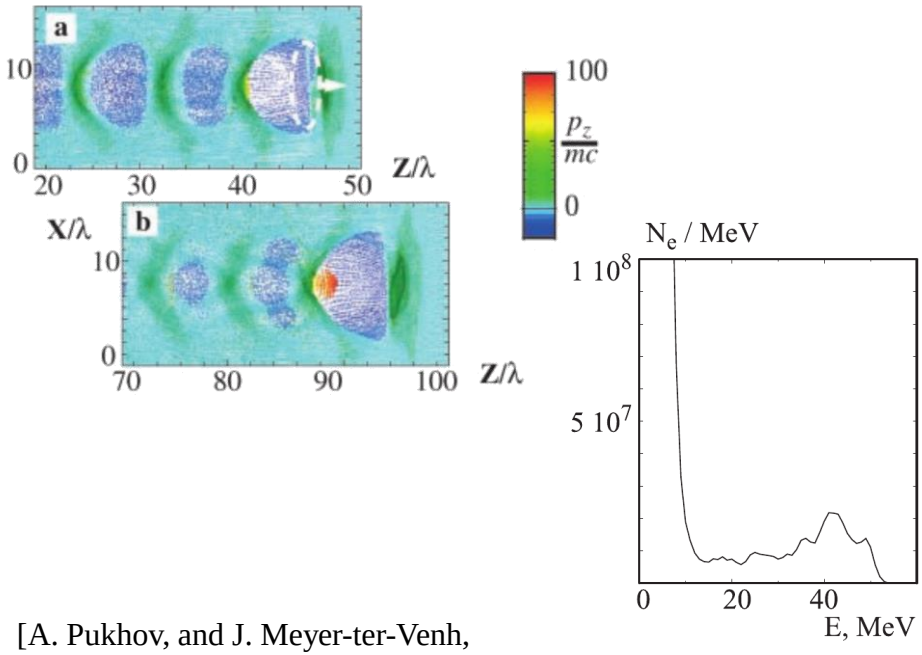
$$\omega_c = \frac{3c\gamma^3}{\rho}$$

[Дж. Джексон, Классическая электродинамика]

Лазерно-плазменное ускорение электронов

Кильватерное ускорение (LWFA)

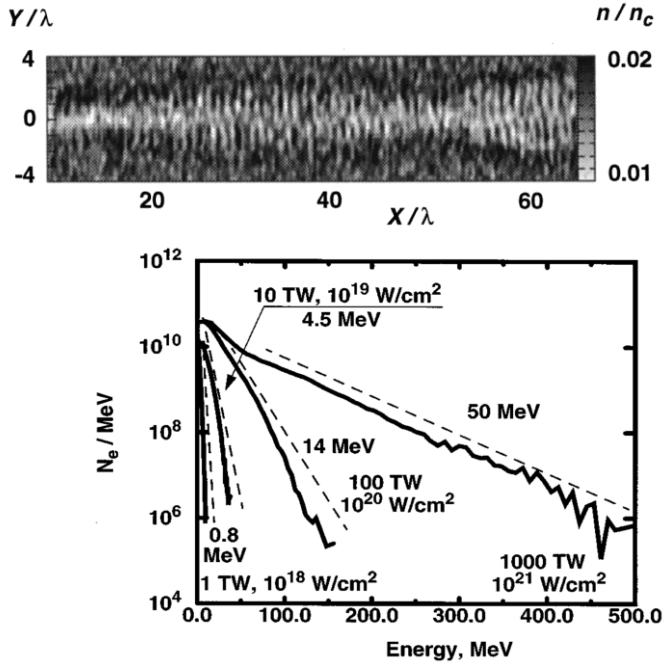
- малоплотная плазменная мишень
- ($L < \lambda_p$) (импульс короче длины плазменной волны)
- моноэнергетический пучок электронов (пКл)



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

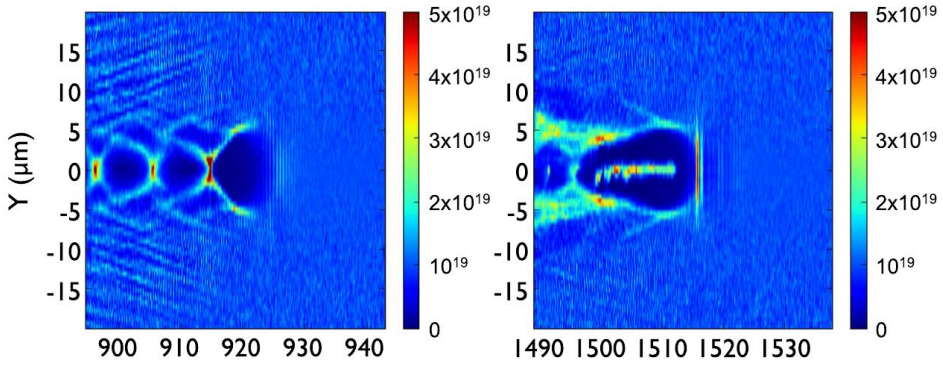
Прямое лазерное ускорение (DLA)

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



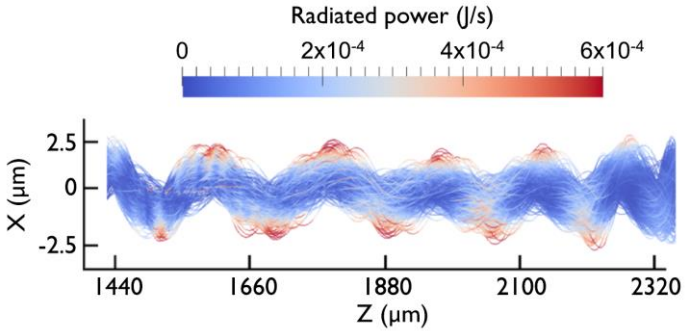
[A. Pukhov, Z.-M. Sheng, and J. Meyer-ter-Venh, Phys. Plasmas **6**, 2847 (1999)]

Бетатронное излучение в режиме LWFA

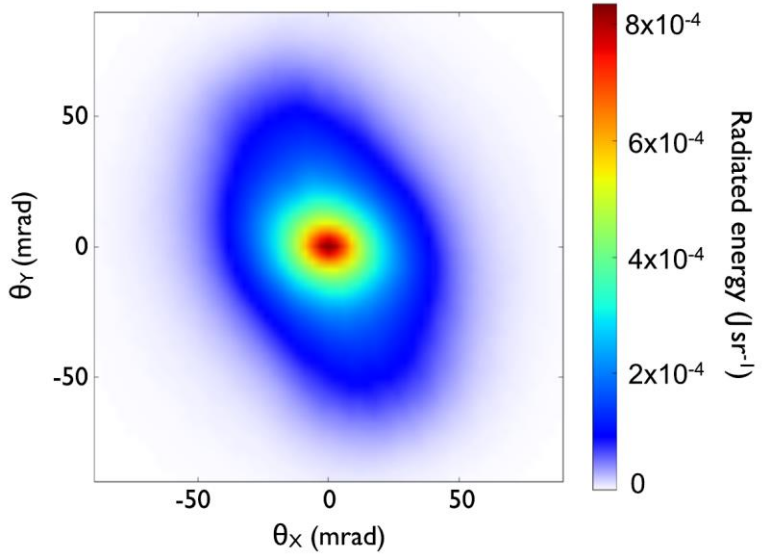


30 фс, a_0 =1.2, 1.5x10^{19}см$^{-3}$

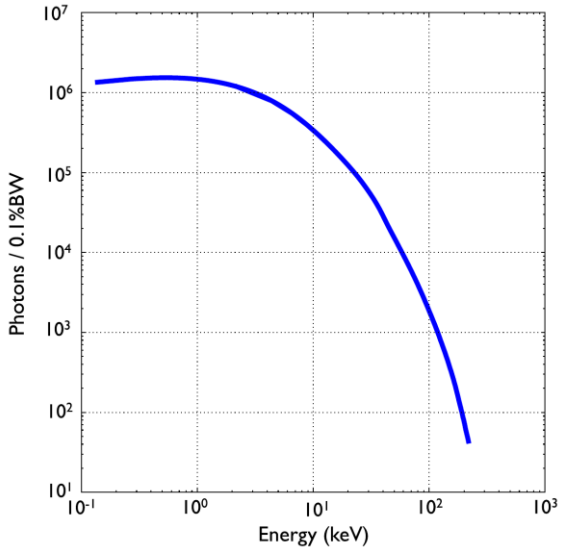
Траектории частиц и излучаемая мощность



Угловое распределение излучения

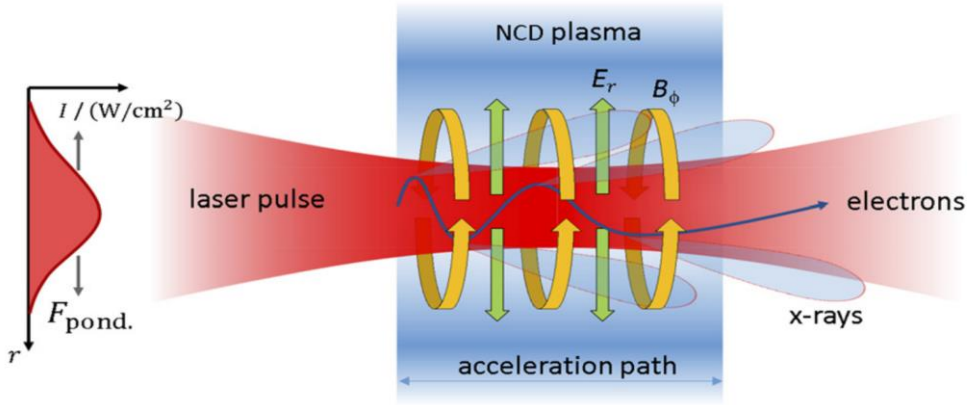


Спектр излучения

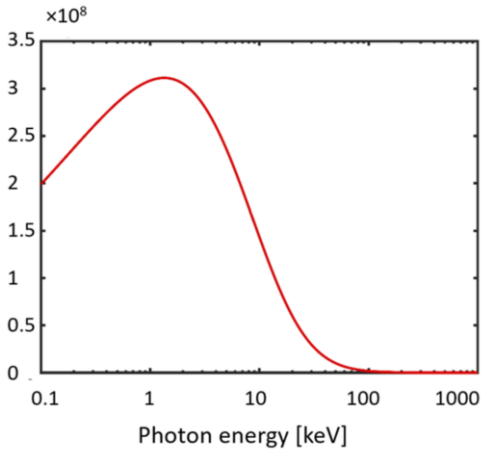


[S. Corde et al. Rev. Mod. Phys.A 85, 1 (2013)]

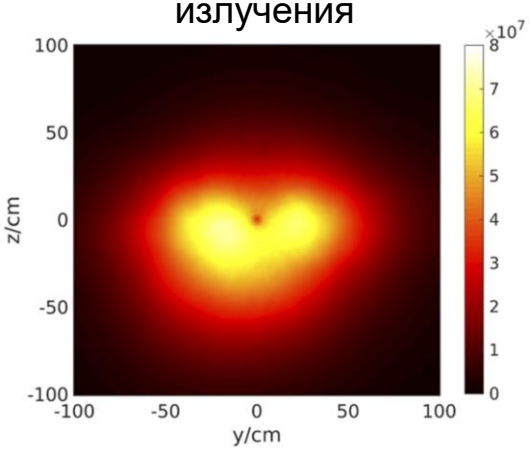
Бетатронное излучение в режиме DLA



$E_{FWHM} \simeq$ 20 Дж, 0.7 пс, a_0 = 4.28, 0.65 n_{cr} (аэрогель), эксперимент + численное моделирование



Угловое распределение излучения



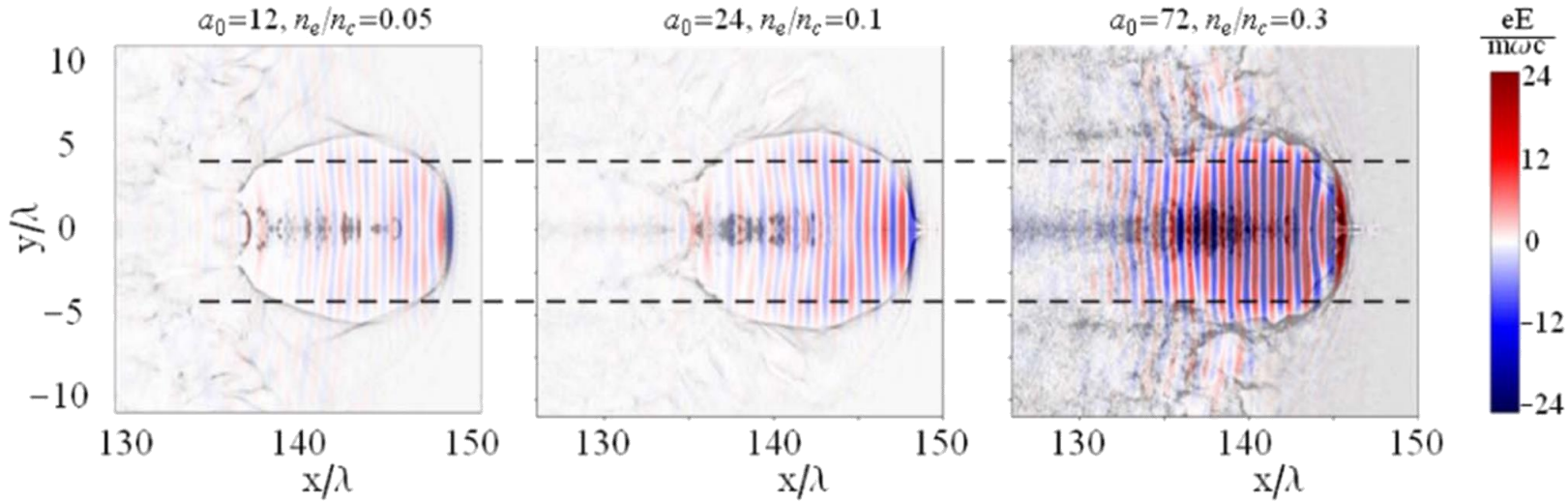
[O. N. Rosmej et al. Matter Radiat. Extremes 6 (4): 048401(2021)]

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 уравновешивается релятивистской нелинейностью → радиус лазерного пучка примерно сохраняется при его распространении на многие рэлеевские длины. Платообразный спектр ускоренных электронов. Высокий заряд быстрых частиц (десятки нКл).



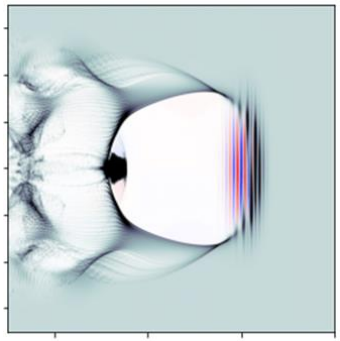
распределение электронной плотности и электрического поля лазерного импульса в плоскости поляризации

[V Yu Bychenkov *et al 2019 Plasma Phys. Control. Fusion* ***61 124004***]

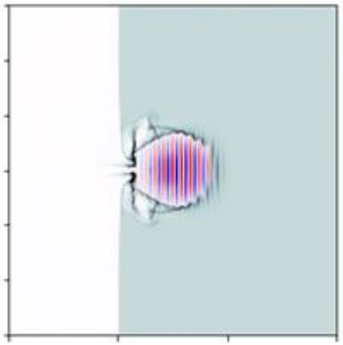
Режим релятивистского самозахвата лазерного импульса

различные длительности лазерного импульса

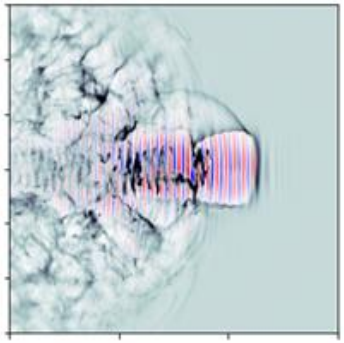
пузырь
$(c\tau << D)$

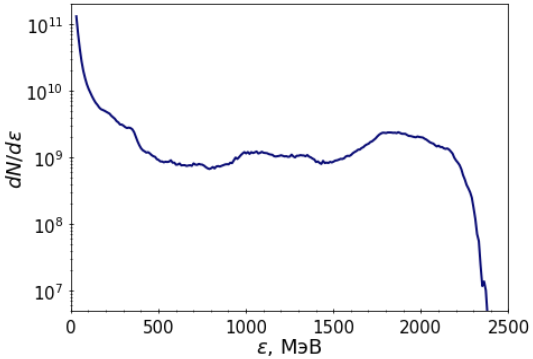


лазерная пуля
$(c\tau \approx D)$



самомодуляция
лазерного импульса
$(c\tau > 3D)$



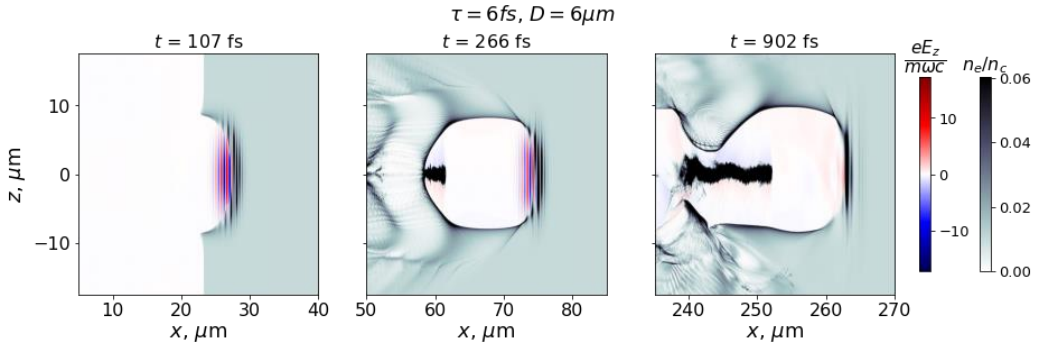


платообразный спектр

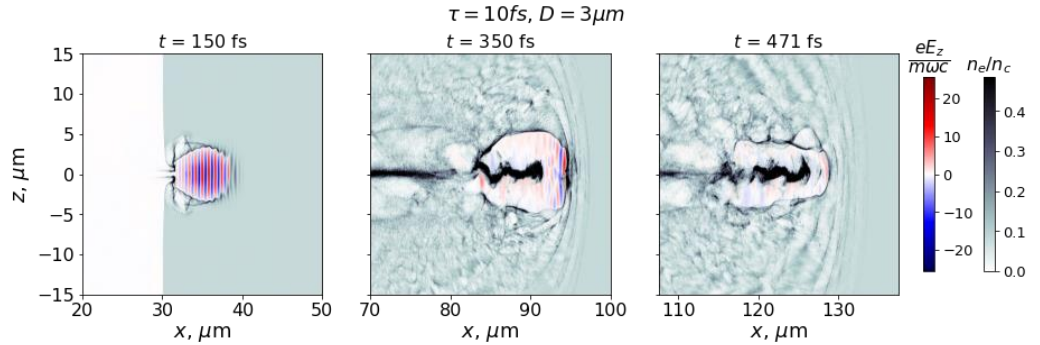
в случае плотной плазмы

Динамика лазерно-плазменной структуры

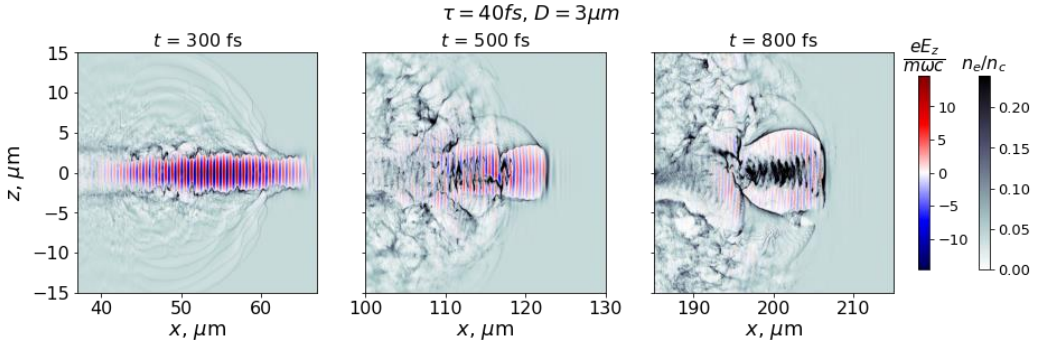
пузырь
(bubble)



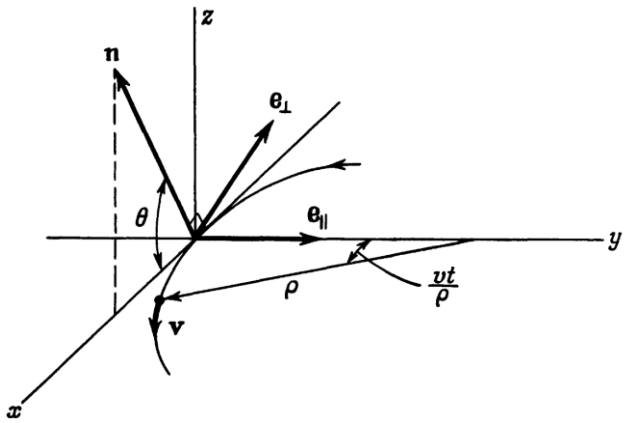
лазерная
пуля



режим
самомодуляции
(SM-LWFA)



Оценка критической частоты бетатронного излучения в LWFA (без самомодуляции)



критическая частота синхротронного излучения:

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

в случае LWFA:

$$\rho \approx \left(k_\beta^2 r_\beta\right)^{-1}$$
$$\omega_\beta = \omega_p/\sqrt{2\gamma}$$
$$k_\beta r_\beta = v_\perp/c \approx \theta$$

стабильное распространение:

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

энергия ускоренных электронов :

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

критическая частота

заданная энергия и длительность

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

плотная плазма

лазерная пуля ($c\tau \approx D$)

заданная энергия и диаметр

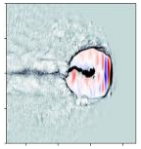
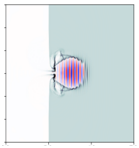
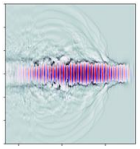
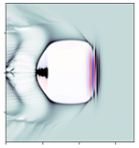
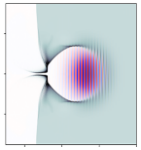
$$\hbar\omega_c \propto W_L^{3/2} r_\beta \sqrt{\tau}/D^3 \longrightarrow \hbar\omega_c \propto r_\beta\sqrt{\tau}$$

$$\tau \propto n_e^{-2} \quad \text{и} \quad r_\beta = r_\beta(n_e)$$

возрастающая функция плотности → требуются дополнительные расчеты

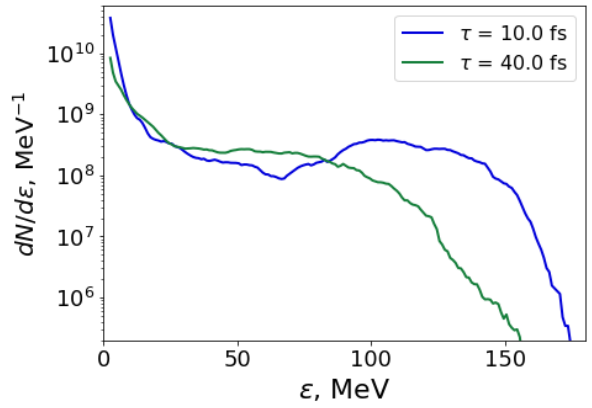
Параметры моделирования

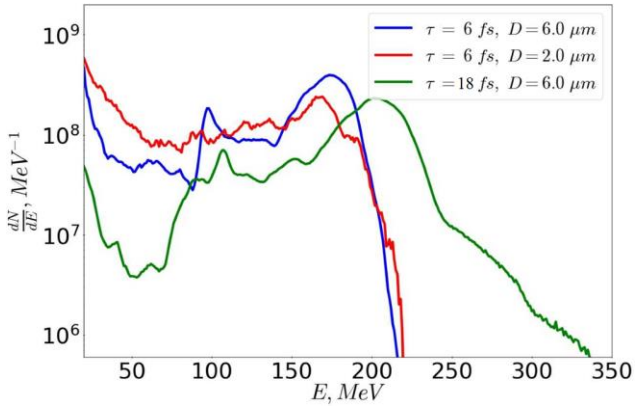
Лазерный импульс: 0.85 Дж, длина волны 0.8 мкм

τ, фс	D_F, мкм	a_0	n_e/n_c	режим	
6	2	37.2	0.341	лазерная пуля	
10	2.8	20.6	0.097	лазерная пуля	
40	2.8	10.3	0.048	SM-LWFA	
6	6	12.4	0.012	пузырь	
18	6	7.1	0.007	лазерная пуля	

Ускорение электронов

Энергетические спектры электронов





τ, фс	D_F, мкм	$Q_{>20МэВ}$	$W_{>20МэВ}$	форма спектра
10	2.8	4.7 нКл	400 мДж	плато
40	2.8	3.2 нКл	183 мДж	плато

лазерная пуля и SM-LWFA

τ, фс	D_F, мкм	$Q_{>20МэВ}$	$W_{>20МэВ}$	форма спектра
18	6	2.5 нКл	440 мДж	моно
6	6	3.9 нКл	530 мДж	моно
6	2	4.1 нКл	410 мДж	плато

лазерная пуля и пузырь

для $c\tau \le D$:

$$Q_0 \sim en_e D^3 \propto \sqrt{W_L/\tau} \qquad \varepsilon_e \propto a_0 D\tau \propto (W_L\tau)^{1/2}$$

$$\eta \propto Q_0 \times \varepsilon_e / W_L \propto W_L / W_L$$

Численный расчет синхротронного излучения

Расчет вторичного излучения как постпроцессинг для 3D PIC моделирования:

- торможение излучением пренебрежимо мало
- временные зависимости импульсов и координат 3000 случайных частиц из 3D PIC расчета, отвечающих платообразной части спектра
- в лабораторной СО вторичное излучение имеет очень большую скважность → расчет спектральной мощности путем интегрирования (вместо Фурье по запаздывающему времени)
- размер электронного пучка превышает длину волны вторичного излучения → излучение некогерентно

спектральная плотность мощности излучения

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

угловое распределение мощности

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c}\frac{\left|\left[\mathbf{n}\times\left[(\mathbf{n}-\boldsymbol{\beta})\times\dot{\boldsymbol{\beta}}\right]\right]\right|^2}{(1-\boldsymbol{\beta}\cdot\mathbf{n})^5},$$

мгновенная мощность

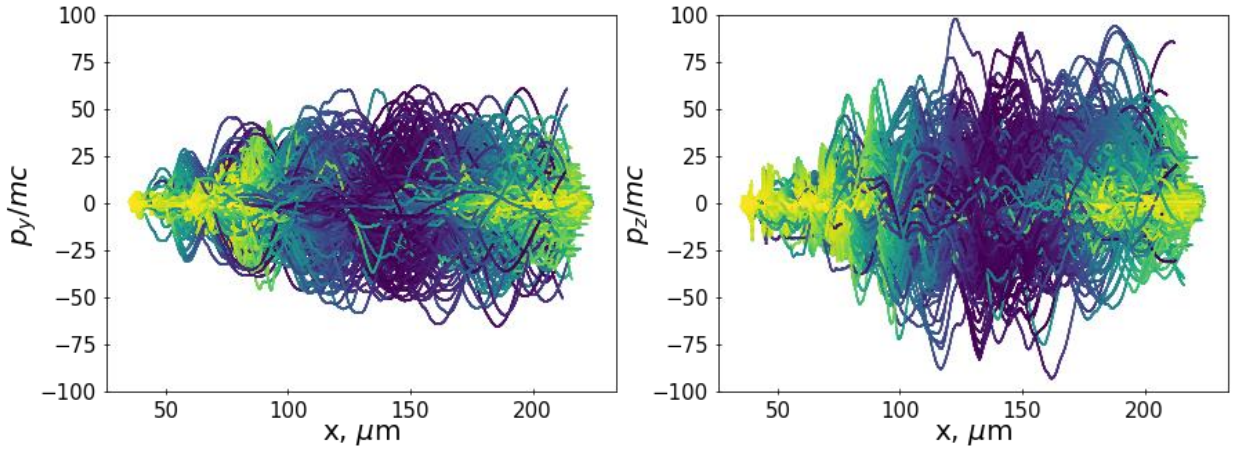
$$\mathrm{P} = \frac{2}{3}\frac{\mathrm{e}^2}{\mathrm{c}}\gamma^6\left(\dot{\beta}^{\,2} - \left[\beta\times\dot{\beta}\right]^2\right),$$

Динамика компонент импульса электронов

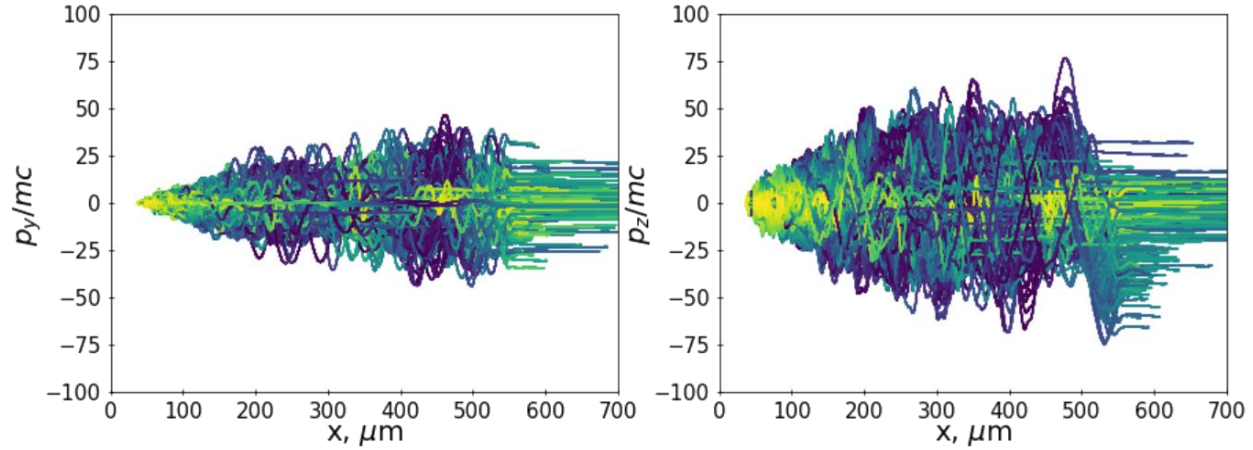
перпендикулярно поляризации

вдоль поляризации

τ = 10 фс



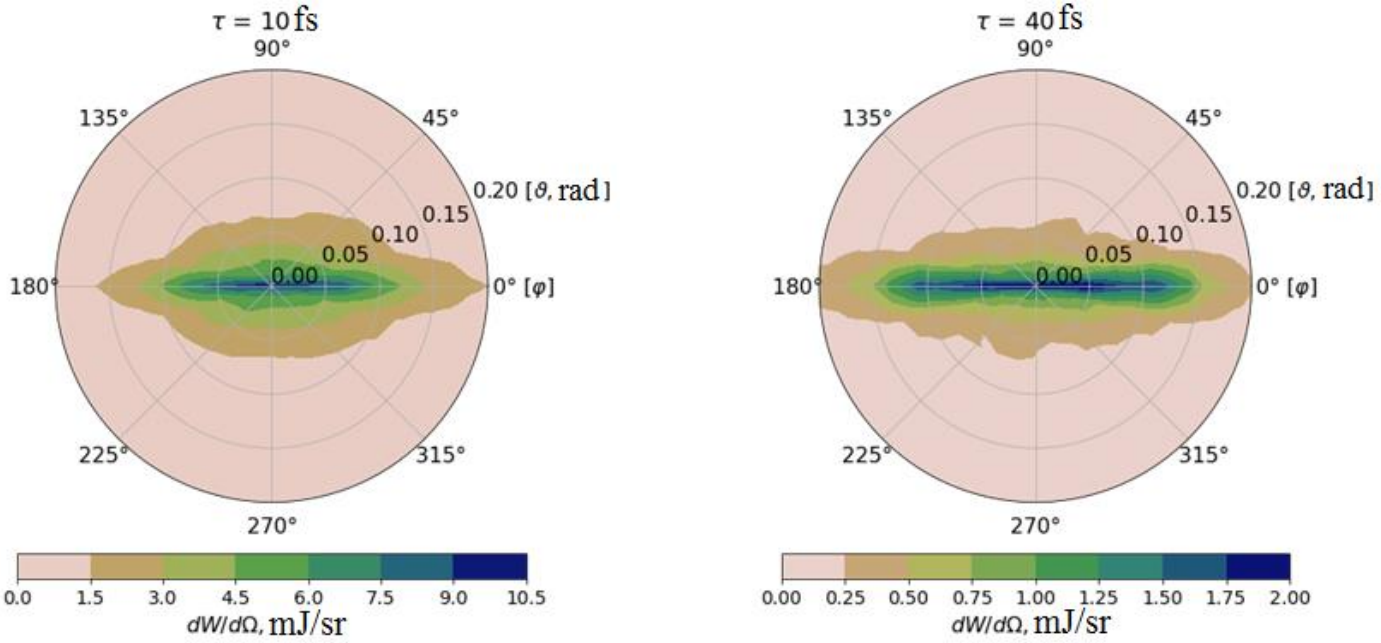
τ = 40 фс



$\approx (2\gamma)^{-1} \sim 10^{-4}$ – угол между направлением движения частицы и направлением излучения

Угловые распределения энергии синхротронного излучения

лазерная пула и SM-LWFA



Распределение энергии между компонентами вторичного излучения

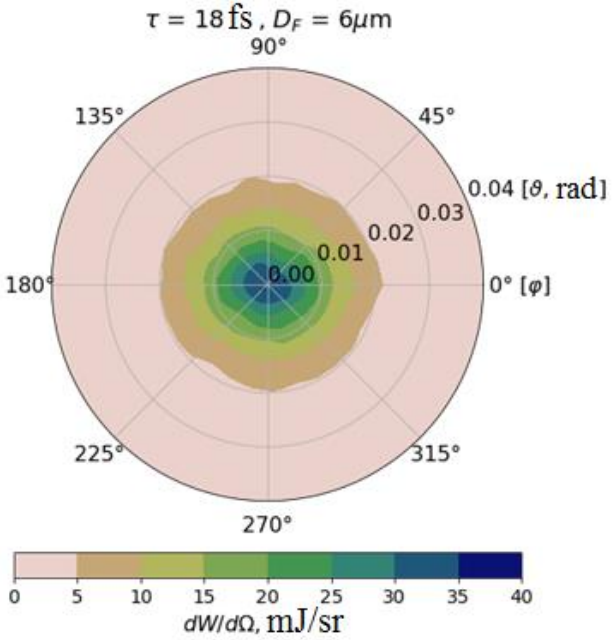
$$\zeta = \frac{I_z - I_y}{I_z + I_y}$$

для τ = 10 фс: $\zeta \approx 0.74$
для τ = 40 фс: $\zeta \approx 0.77$

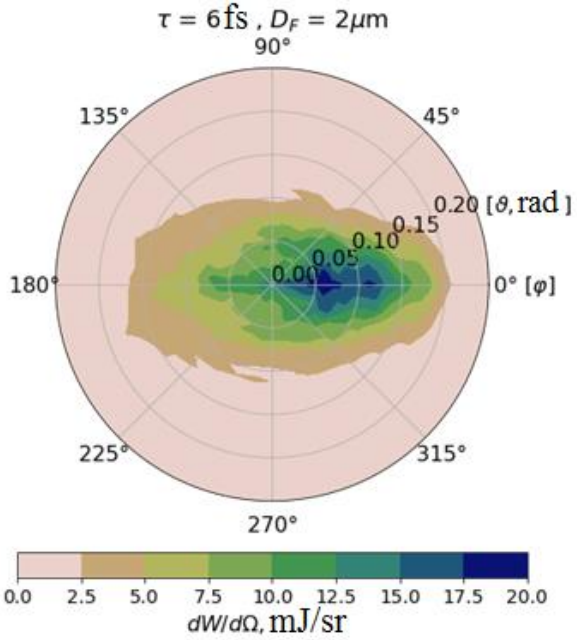
$I_{y,z} = \frac{1}{T_{gen}} \iint E^2_{y,z}(t_l) dt_l dN$ – средняя интенсивность синхротронного излучения в излучаемой компоненте

Угловые распределения энергии синхротронного излучения

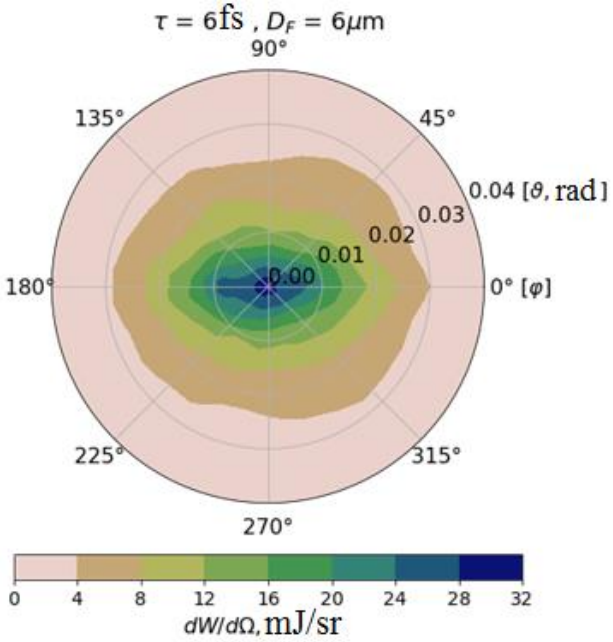
лазерная пуля и пузырь



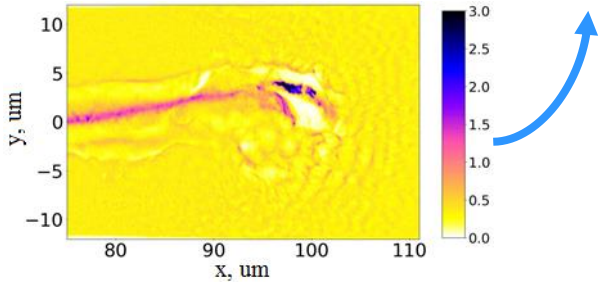
лазерная пуля в малоплотной плазме



лазерная пуля в плотной плазме

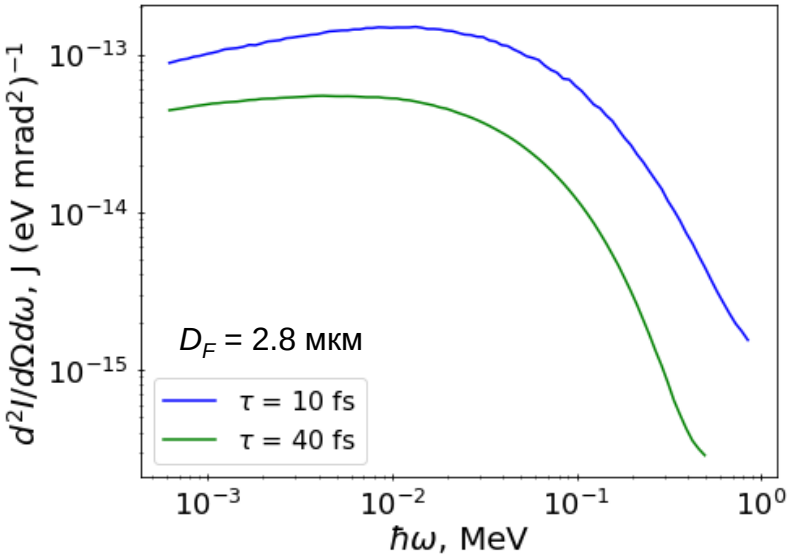


пузырь (ультракороткий импульс)

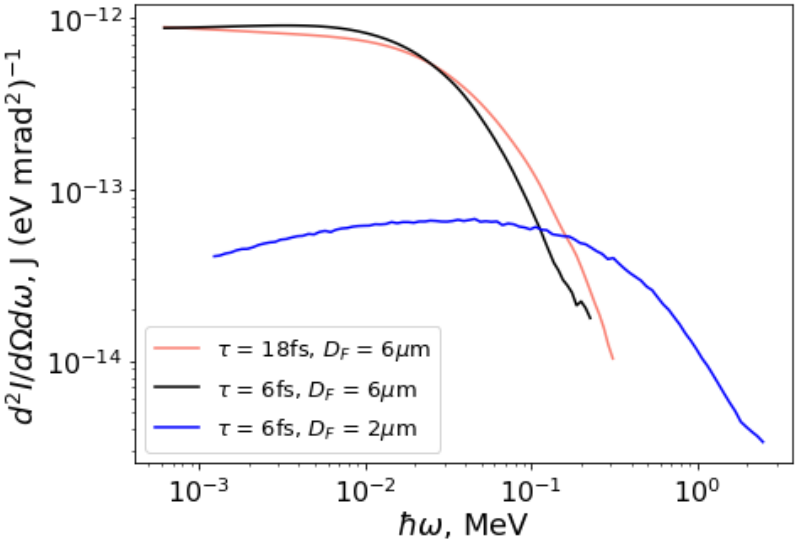


Спектры вторичного излучения (вдоль оптимального направления)

лазерная пуля и SM-LWFA



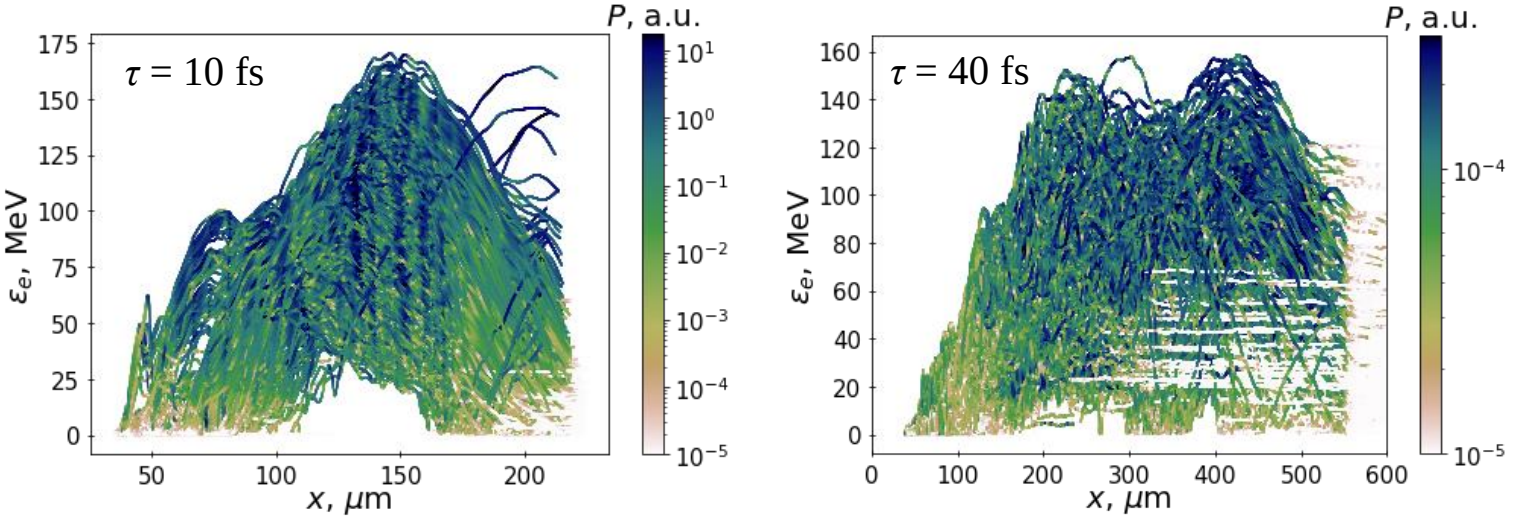
лазерная пуля и **пузырь**



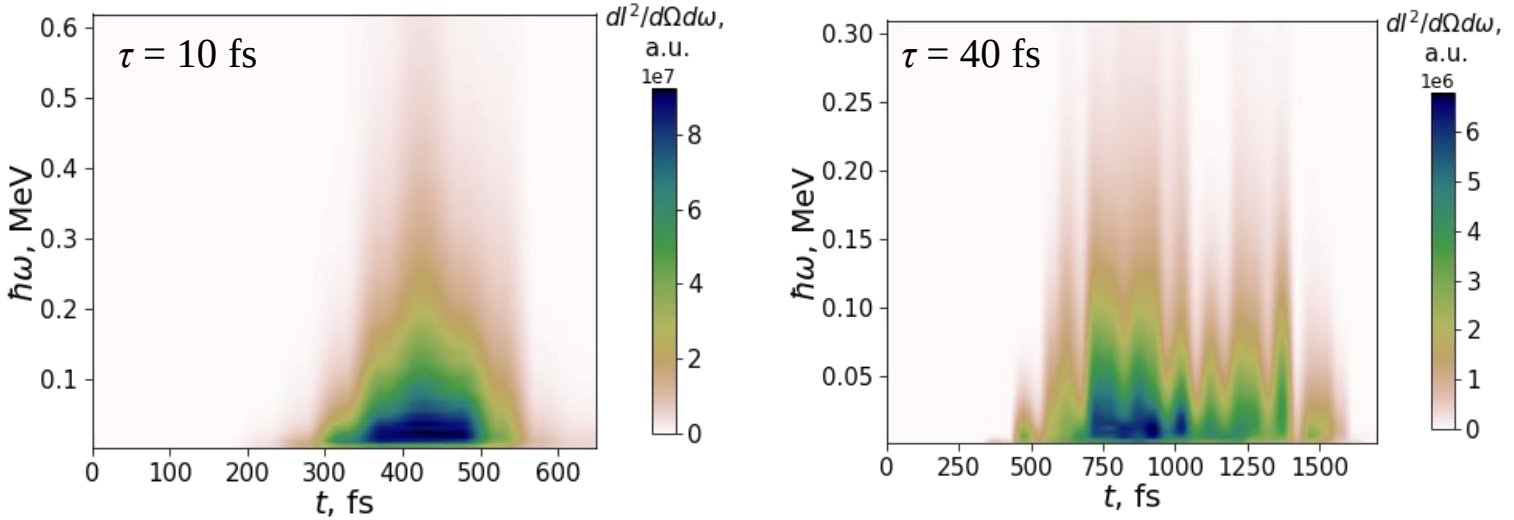
Чем меньше диаметр лазерного пучка, тем выше энергии генерируемых фотонов.

Динамика генерации вторичного излучения

Динамика энергии электронов и излучаемая мощность



Динамика спектров вторичного излучения



Сравнительная таблица характеристик вторичного излучения

	τ = 40 фс D_F = 2.8 мкм	τ = 10 фс D_F = 2.8 мкм	τ = 18 фс D_F = 6 мкм	τ = 6 фс D_F = 6 мкм	τ = 6 фс D_F = 2 мкм
критическая частота	50 кэВ	100 кэВ	10 кэВ	10 кэВ	200 кэВ
длительность излучения	1000 фс	250 фс	2300 фс	730 фс	80 фс
яркость [ph./c/mm^2/mrad^2/ 0.1%b.w.]	~10^{20}	~10^{20}	~10^{20}	~10^{20}	~10^{20}
конверсия	3.5x10^{-5}	15x10^{-5}	2.4x10^{-5}	3.8x10^{-5}	87x10^{-5}
угловая расходимость	125 мрад (25 мрад)	100 мрад (25 мрад)	10 мрад (8 мрад)	15 мрад (8 мрад)	100 мрад (50 мрад)
режим	SM-LWFA	лазерная пуля	лазерная пуля	пузырь	лазерная пуля

для $c\tau \leq D$

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

$l_{dpl} \propto c\tau (k_l D_F)^2$

Более широкий диапазон энергий лазера

W / P	τ, фс	D_F , мкм	a_0	n_e/n_c	$\hbar\omega_c$	яркость*
190Дж/ 7.2ПВт	25	6.9	89	0.5	10 МэВ	8×10^{22}
20Дж/ 625ТВт	30	2.8	72	0.3	1 МэВ	3×10^{22}
2.2Дж/ 70ТВт	30	2.8	24	0.1	100 кэВ	1.2×10^{22}
0.85Дж/ 20ТВт	40	2.8	10.3	0.048	50 кэВ	1.1×10^{20}

* phot./c/mm^2/mrad.^{2}/0.1%b.w.

Выводы

Для лазерного импульса с энергией 0.85 Дж

SM-LWFA и **лазерная пуля** (одинаковый диаметр и 4-х кратное укорочение):
- уширение спектра примерно в 2 раза
- ≈4-х кратное увеличение конверсии (в отличие от 2-х кратного увеличения конверсии в электроны)

пузырь и **лазерная пуля**:
- Одинаковые диаметры. Одинаковые критические частоты. Для пузыря коэффициент конверсии в 1.5 раза выше (плотнее мишень и выше a_0).
- Одинаковые длительности. Режим лазерной пули приводит к большим энергиям фотонов и большему коэффициенту конверсии.

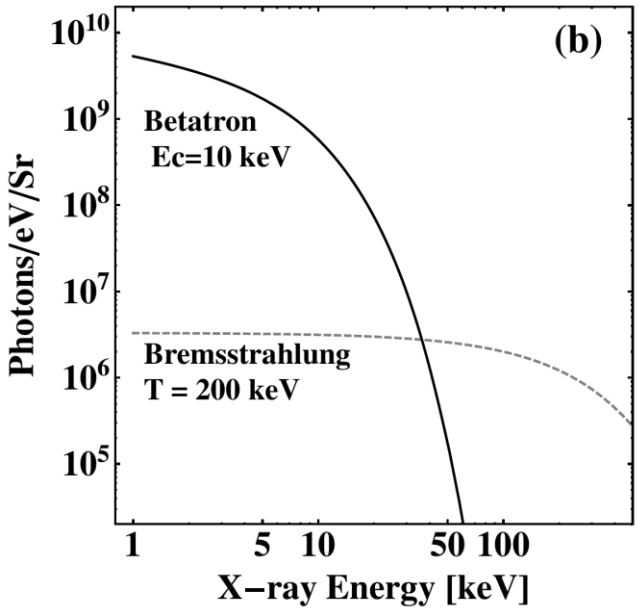
Для более жестких энергий фотонов требуется более жесткая фокусировка лазерного импульса.

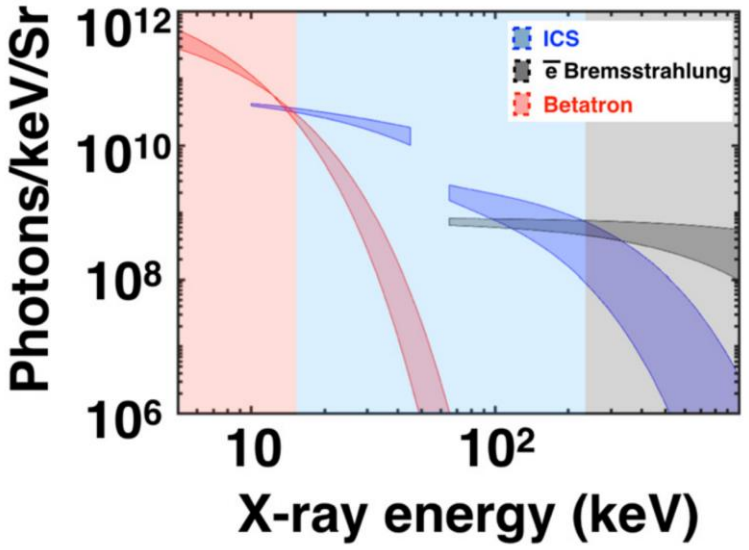
Список работ по ускорению электронов и синхротронному излучению

1. M. G. Lobok, I. A. Andriyash, O. E. Vais, V. Malka, V. Yu. Bychenkov, Bright synchrotron radiation from relativistic self-trapping of a short laser pulse in near-critical density plasma, Phys. Rev. E, Vol. 104, p. L053201, 2021
2. Вайс О.Е., Лобок М.Г., Быченков В.Ю., Сверхъяркий лазерный источник гамма-излучения на основе бетатронного механизма, Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 3. С. 242-247.
3. Вайс О.Е., Лобок М.Г., Соловьев А.А., Миронов С.Ю., Хазанов Е.А., Быченков В.Ю., Эффективное ускорение электронов фемтосекундными лазерными импульсами умеренной мощности, Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. № 11-12. С. 871-876.
4. O. E. Vais, M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov, Compression of high-power laser pulse leads to increase of electron acceleration efficiency, Phys. Rev. E, Vol. 110, p. 065202, 2024
5. Вайс О.Е., Лобок М.Г., Быченков В.Ю., Генерация синхротронного излучения при взаимодействии мультитераваттного лазерного импульса с прозрачной плазмой, Физика плазмы. 2025. Т. 51. № 4. С. 382-393.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Сравнение синхротронного излучения с другими режимами

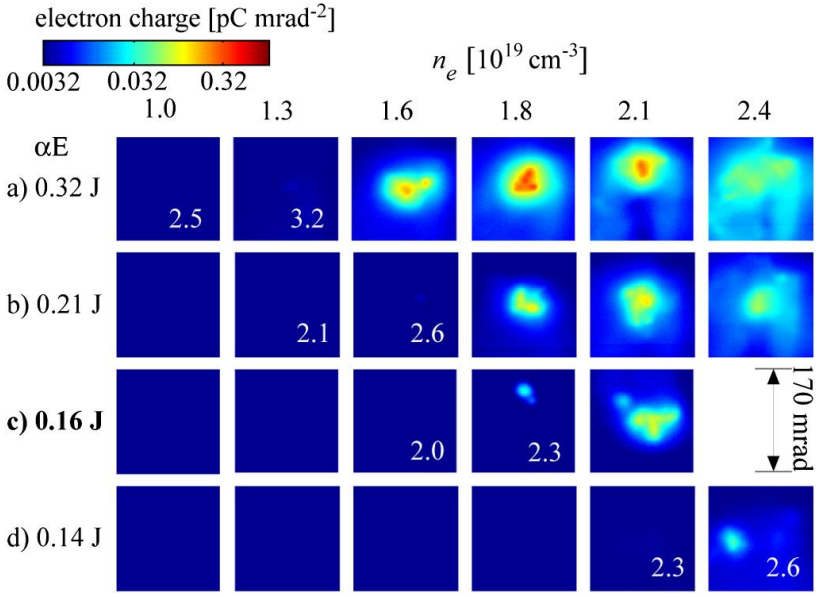


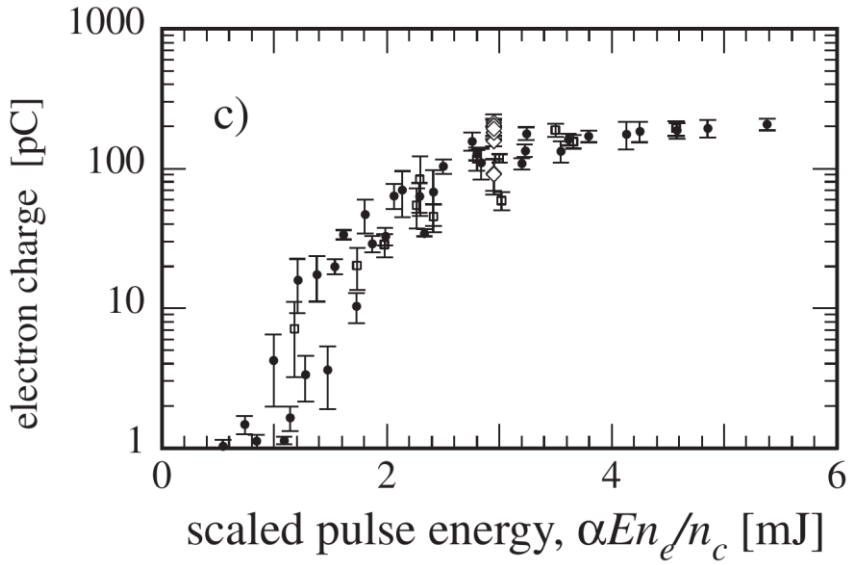


SMLWFA $a_0 = 3.05$, $n_e = 10^{19}$ cm^{-3}
0.7 пс, численный расчет + эксперимент
[F. Albert et al., Phys. Rev. Lett. 118, 134801 (2017)]

Серия экспериментов с пикосекундными лазерными импульсами кДж энергии
[N. Lemos et al., Phys. Plasmas 26 (8): 083110 (2019)]

Самоинжекция электронов





Существует порог самоинжекции!
Меньшая энергия лазерного импульса → порог при большей плотности

[S.P.D. Mangles et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 011302 (2012)]