



ПРОЕКТ XCELS

Сверхъяркий лазерный источник гамма излучения
на основе бетатронного механизма.
Диагностика экстремального света.

О. Е. Вайс

СВЕРХЪЯРКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БЕТАТРОННОГО МЕХАНИЗМА

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

¹ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН)

² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова (ВНИИА)

Постановка эксперимента

Режим релятивистского самозахвата лазерного импульса

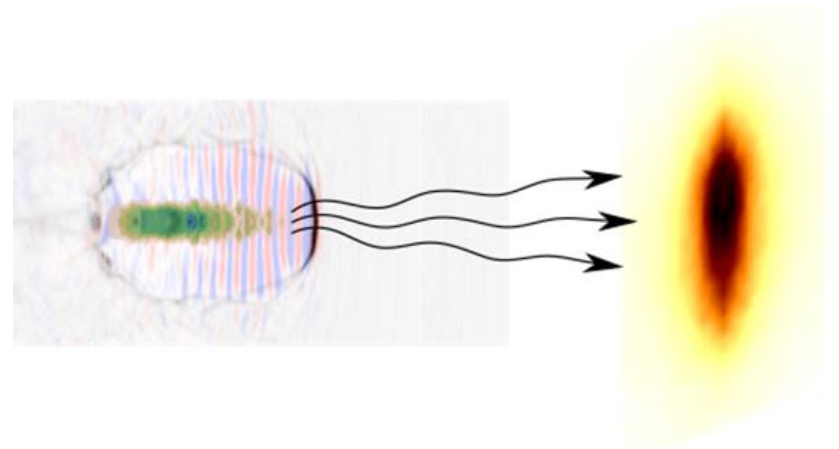
Условие согласования радиуса лазерного пучка, безразмерной амплитуды поля и плотности мишени:

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

Дифракционная расходимость уравнивается релятивистской нелинейностью → радиус сохраняется на протяжении многих рэлеевских длин.

Платообразный спектр ускоренных электронов. Высокий заряд быстрых частиц (десятки нКл).

Схема генерации синхротронного излучения



Бетатронные осцилляции электронов в поперечном поле плазменной мишени при ускорении частиц ее продольным полем → генерация синхротронного излучения.

Моделирование эксперимента

3D-PIC моделирование (VSim)

Параметры расчетов:

- лазерный импульс ($\lambda_l = 0.91$ мкм): линейная поляризация,
 $W = 400$ Дж, $P = 15$ ПВт, $\tau = 25$ фс,
 $D_F = 10$ мкм, $I_p = 1.32 \times 10^{22}$ Вт/см² ($a_0 = 89$)
- мишень: плотность $0.511 n_c$ ($n_c = 1.34 \times 10^{21}$ см⁻³), толщина 455 мкм
- моделирование: движущееся окно $X \times Y \times Z = 58\lambda \times 58\lambda \times 58\lambda$
(разрешение: $0.04\lambda \times 0.1\lambda \times 0.1\lambda$)

Треки 3000 случайных частиц с энергией выше 500 МэВ

Формулы расчета вторичного излучения по трекам частиц:

мгновенная мощность
(релят. обобщ. формулы Лармора):

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

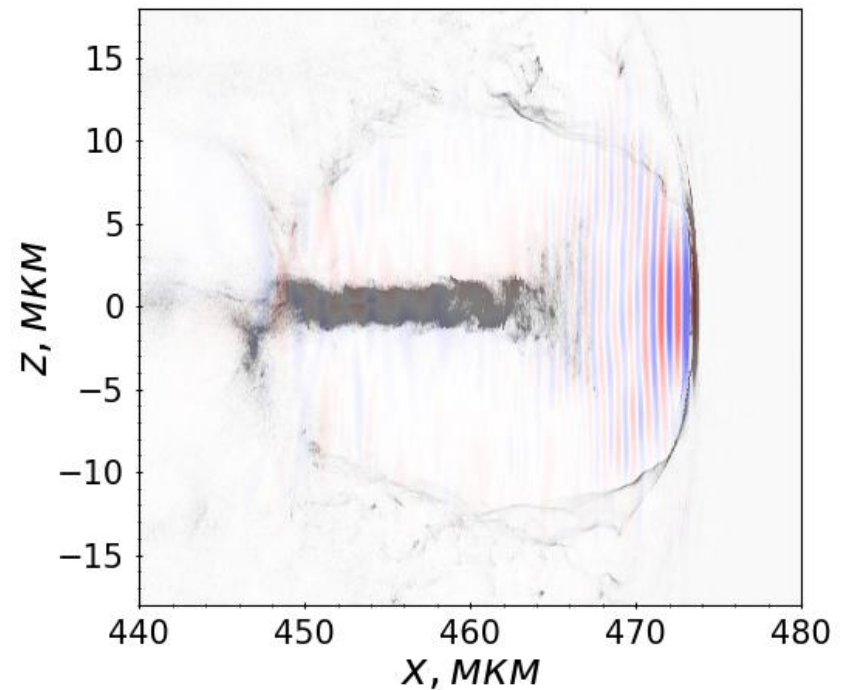
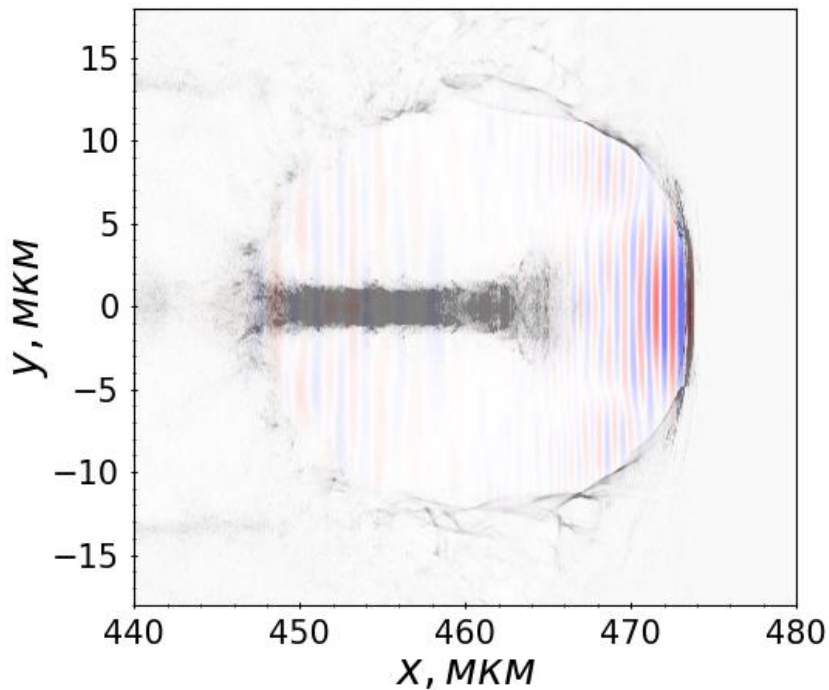
угловое распределение мощности:

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

спектральная плотность мощности излучения:

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

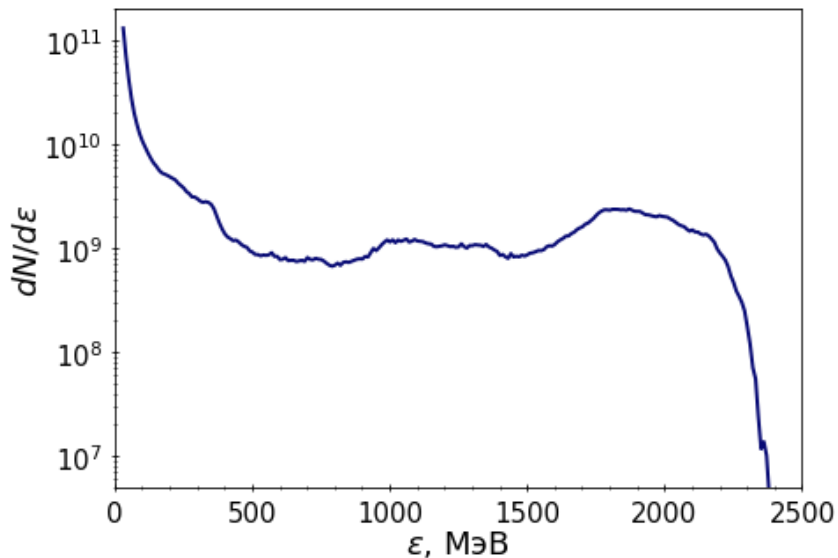
Распределение плотности частиц внутри ускоряющей плазменной полости для параметров, ожидаемых на XCELS



Длина сгустка электронов свыше 10 мкм → возможно некогерентное суммирование характеристик вторичного излучения

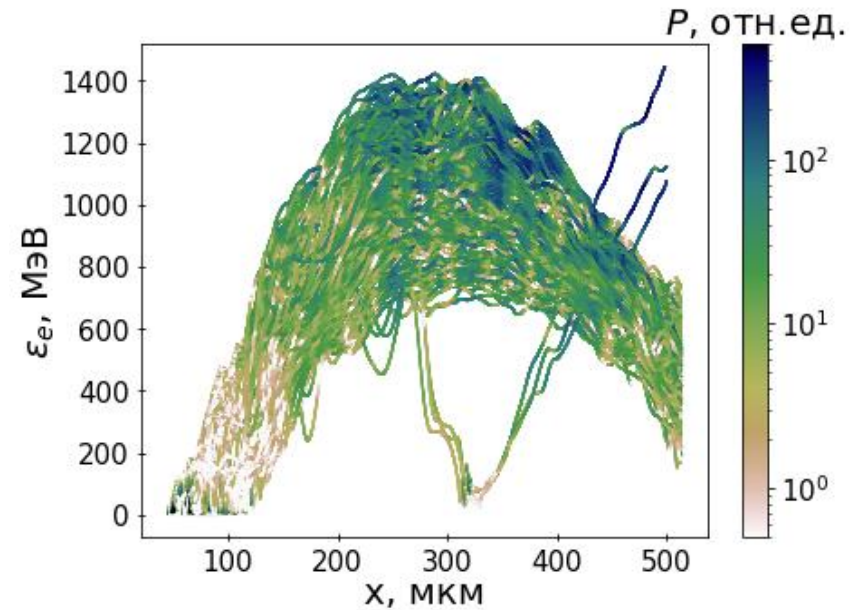
Характеристики ускоренного пучка электронов

Энергетический спектр электронов.



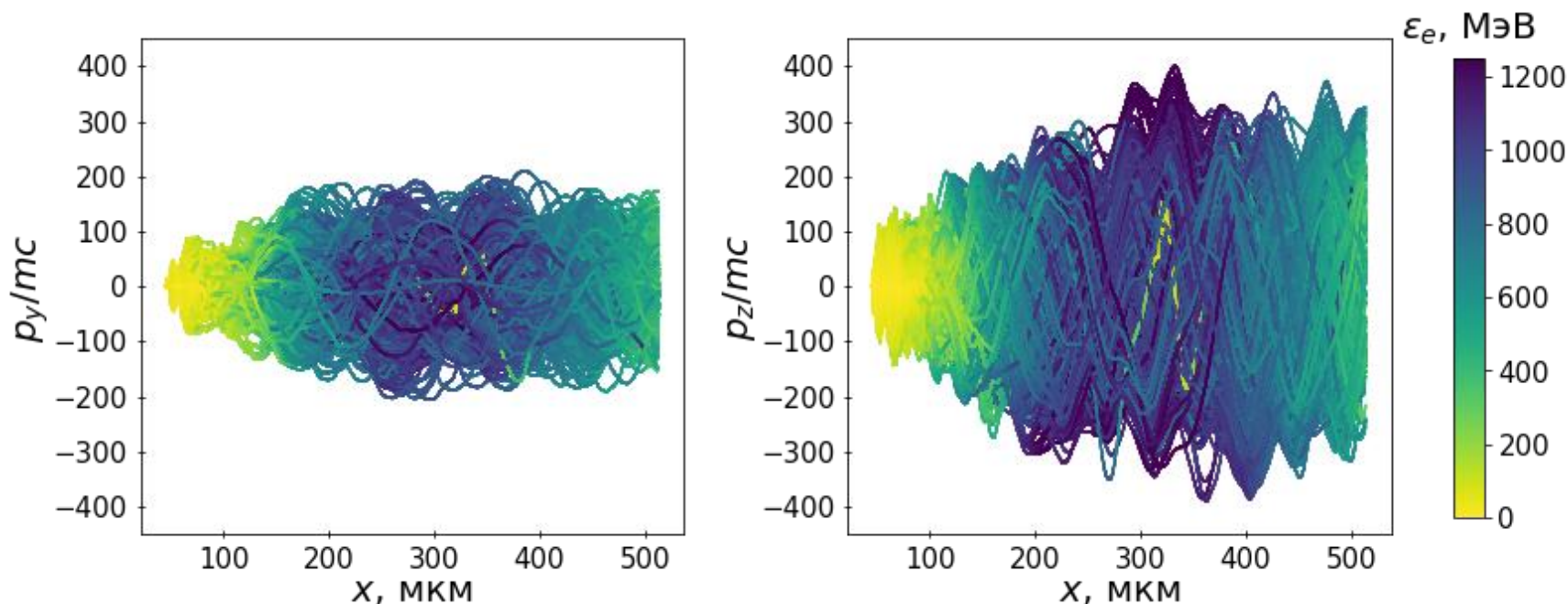
$$Q_{>500\text{МэВ}} \approx 40 \text{ нКл}$$

Динамика энергии электронов.
Мгновенная излучаемая мощность.



длина дефазировки около 200 мкм

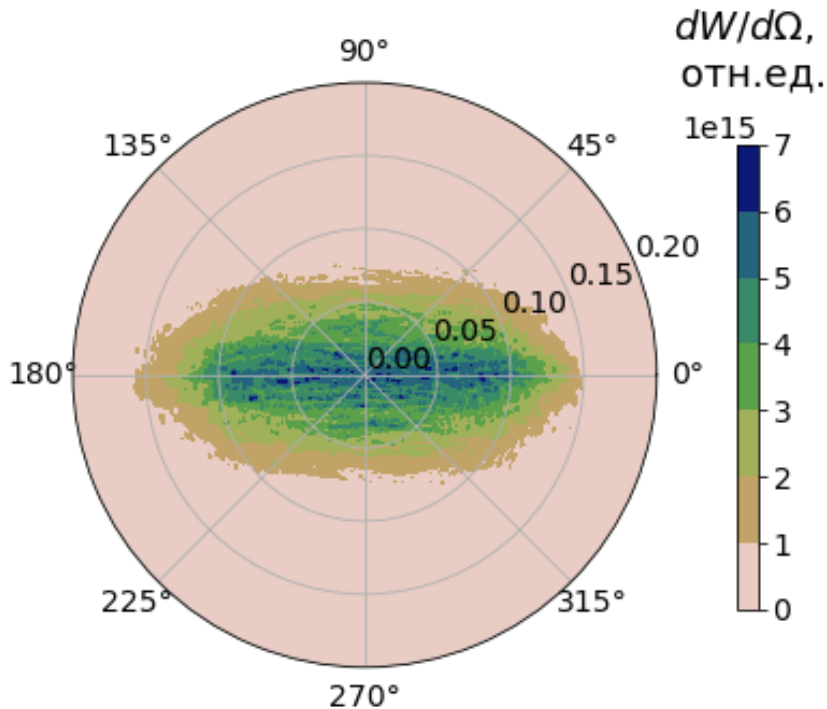
p_z и p_y компоненты импульса частиц при их ускорении плазменной полостью вдоль оси x



$\approx (2\gamma)^{-1} \sim 10^{-4}$ – угол между направлением движения частицы и направлением, в котором происходит наиболее мощное излучение \rightarrow направление излучения определяется направлением движения частицы

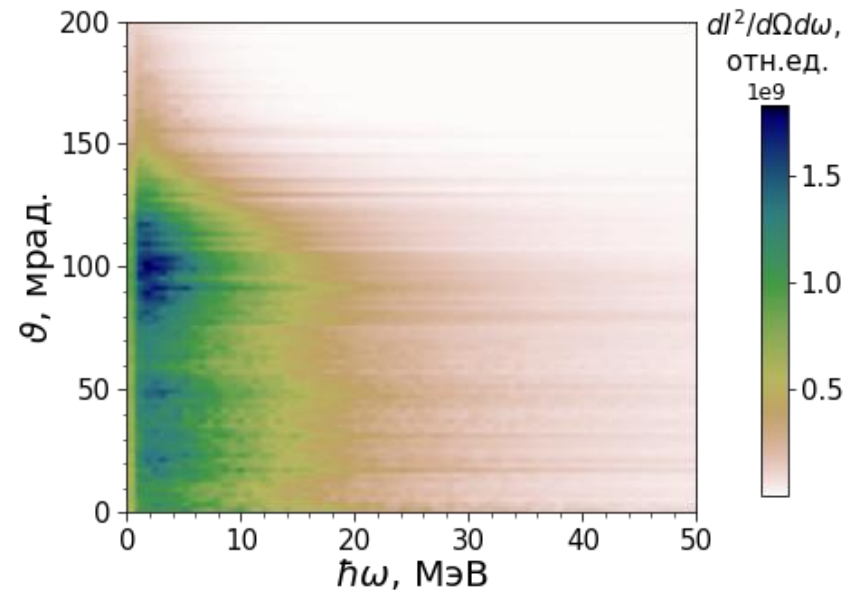
Угловые распределения синхротронного излучения

Угловое распределение излученной энергии



$$\vartheta_z / \vartheta_y \approx (p_z / p_y)_{\max}$$

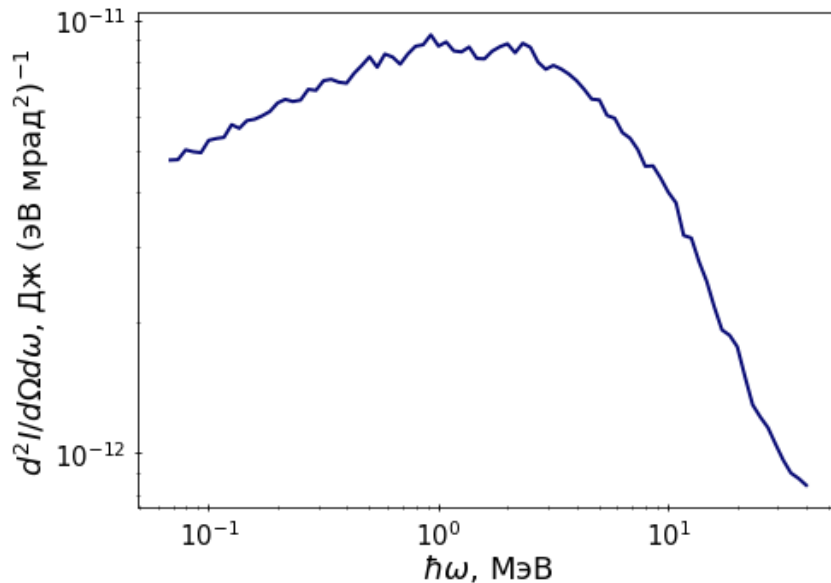
ϑ -распределение спектров синхротронного излучения



в направлении поляризации:

$$\varphi = 0^\circ$$

Спектр фотонов синхротронного излучения в направлении распространения лазерного импульса: $(\vartheta, \varphi) = (0, 0)$.



Характеристики:

- размер 2.5 мкм
- длительность генерации 50 фс
- максимум энергии переизлучается на 2.5 МэВ
- ширина спектра около 10 МэВ
- $N_{\text{ph}, > 1 \text{ МэВ}} \approx 5 \times 10^{11}$

частота излучения	яркость, ф./с/мм ² /мрад ² /0.1%b.w.
2.5 МэВ	7×10^{23}
10 МэВ	8×10^{22}



Требования к эксперименту

- Выполнение условия согласования интенсивности излучения, диаметра пятна и плотности мишени
- Устойчивый режим: относительное отклонение характеристик излучения меньше относительной ошибки параметров эксперимента [Lobok M. G., Andriyash I. A., Vais O. E., Malka V., Bychenkov V. Yu. Phys. Rev. E, 104, L053201 (2021)]
- Мишень: газовая ячейка, газовая струя высокой плотности либо мишень, образующаяся при предварительной гомогенизации пенной мишени [Rosmej O. N. et al. New J. Phys., 21, 043044 (2019)]
- Для мишени с преплазмой положение фокуса и диаметр фокального пятна должны быть согласованы с масштабами неоднородности [Bychenkov V. Yu. and Lobok M. G., JETP Lett. 114, 579 (2021)]

Заключение

- Устойчивый режим генерации яркого синхротронного рентгеновского излучения
- Для лазерного импульса мощностью 15 ПВт, длительностью 25 фс при фокусировке в 10 мкм характеристики источника:
 - угловая направленность 75-150 мрад,
 - критическая частота около 10 МэВ (максимум энергии в 2.5 МэВ),
 - яркость превышает 10^{23} фотонов/с/мм²/мрад²/0.1%b.w.

ДИАГНОСТИКА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СВЕТА

**О. Е. Вайс^{1,2}, К. А. Иванов^{1,3}, И. Н. Цымбалов³, Н. Д.
Бухарский⁴, В. Ю. Быченков^{1,2}, Ф. А. Корнеев^{1,4}, А. Б.
Савельев-Трофимов¹**

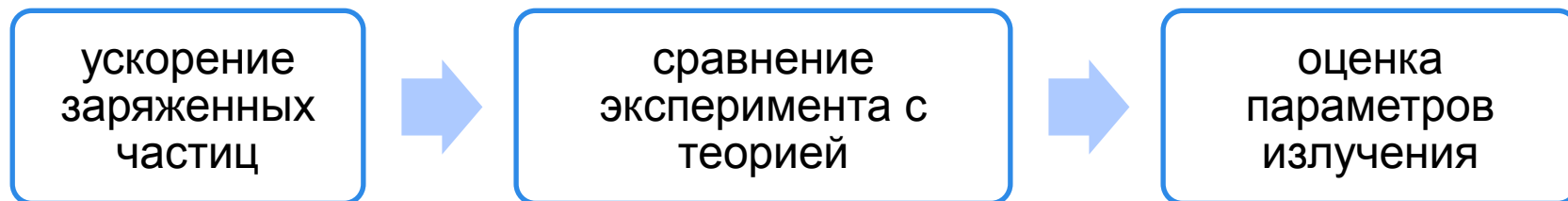
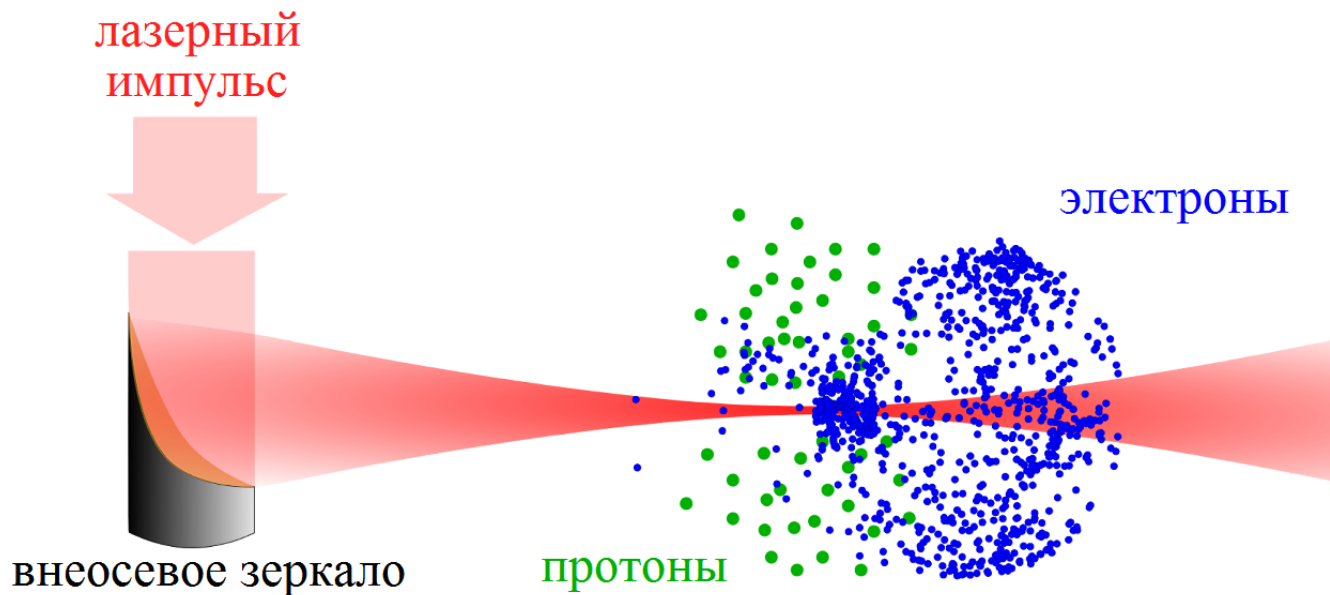
¹ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН)

² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им.Н.Л. Духова (ВНИИА)

³ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ)

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Постановка эксперимента



Моделирование эксперимента

Лазерный импульс ($\lambda_l = 0.91$ мкм):
линейная поляризация,
мощность 15 ПВт, $\tau = 25$ фс

Первоначальная область
расположения частиц:

$$x:y:z = 2.3D_F : 2.3D_F : 7.6D_F^2$$

Метод тестовых частиц:

- электроны

$$\frac{dm_e v \gamma}{dt} = e \left(E + \frac{[v \times B]}{c} \right),$$

$$\frac{dR}{dt} = v,$$

- протоны

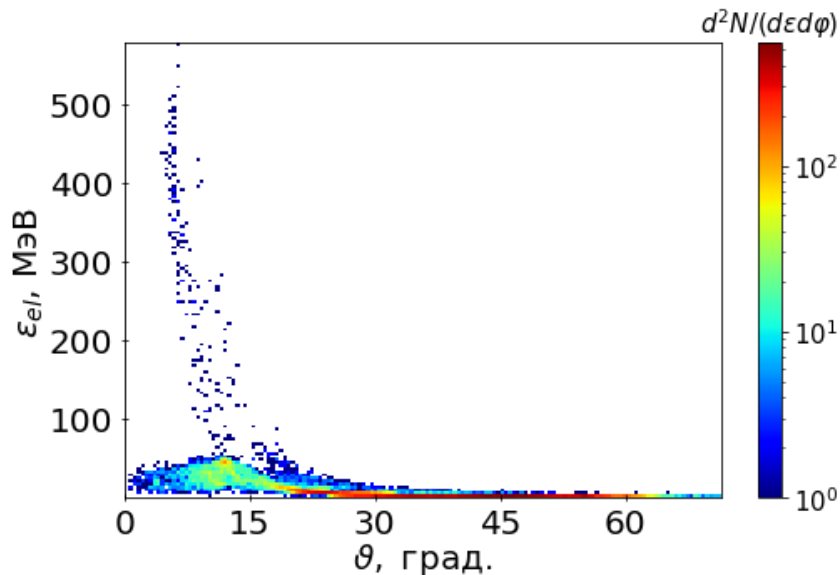
$$\frac{dp_{drift}}{dt} = F_p = -\frac{q^2}{4m\omega_0^2} \nabla |E|^2,$$

Пиковые интенсивности лазерного
излучения мощностью 15 ПВт

D_F , мкм	I_F , 10^{22} Вт/см ²
2.5	21.93
3.6	9.99
4.7	5.91
5.9	3.78
7.1	2.63

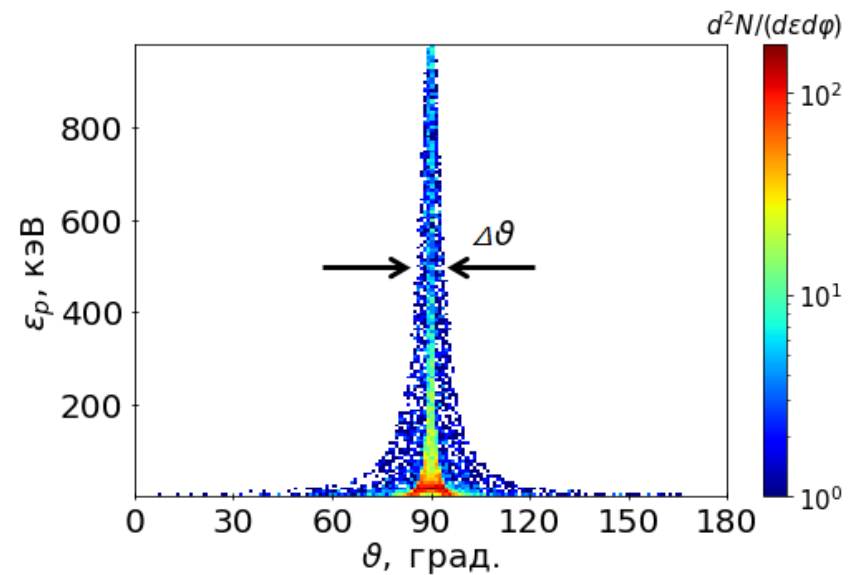
Характерные распределения частиц, ускоренных лазерным импульсом (15 ПВт, 25 фс)

Распределение электронов



релятивистские частицы,
углы вылета $< 30^\circ$

Распределение протонов



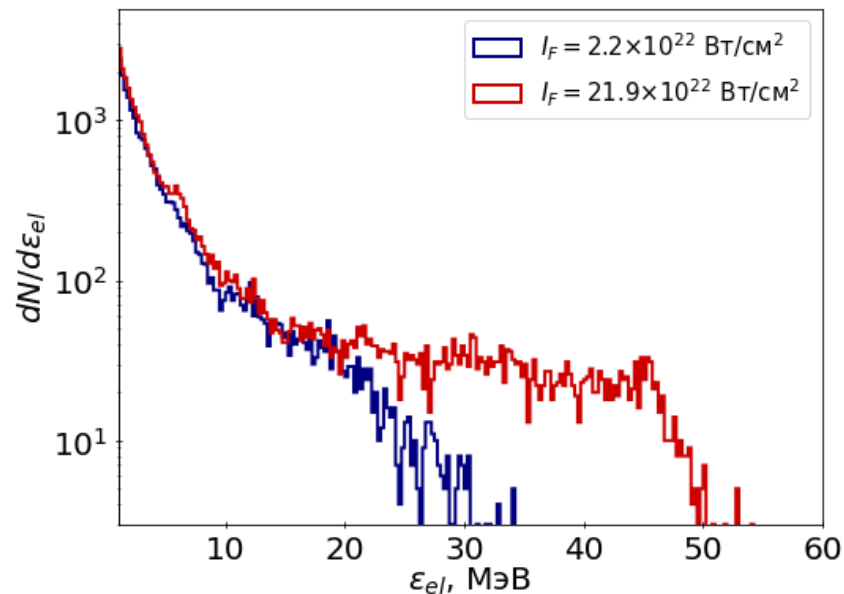
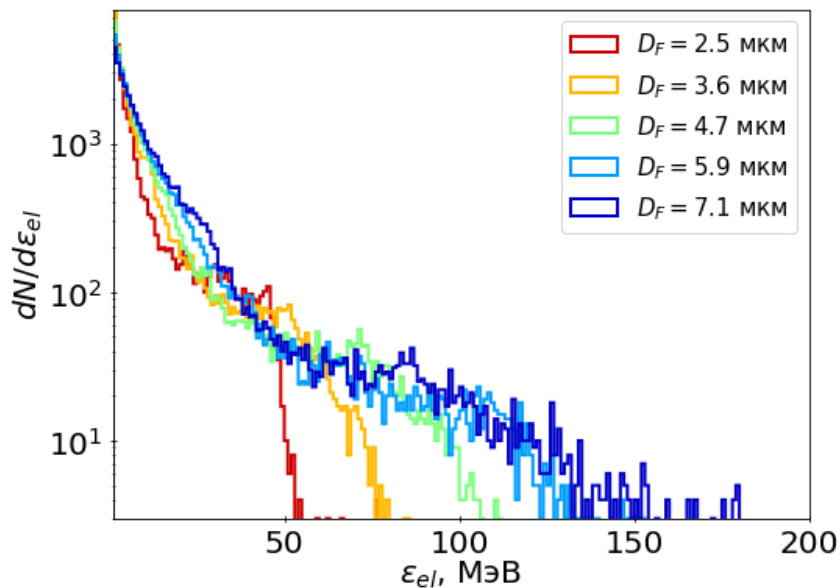
нерелятивистские частицы,
углы вылета около 90°

фокусировка в пятно диаметром 2.5 мкм

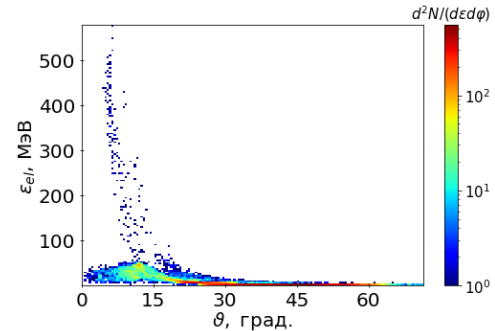
Интегральные спектры электронов

Заданная мощность лазерного импульса (15 ПВт)

Заданный диаметр (2.5мкм)

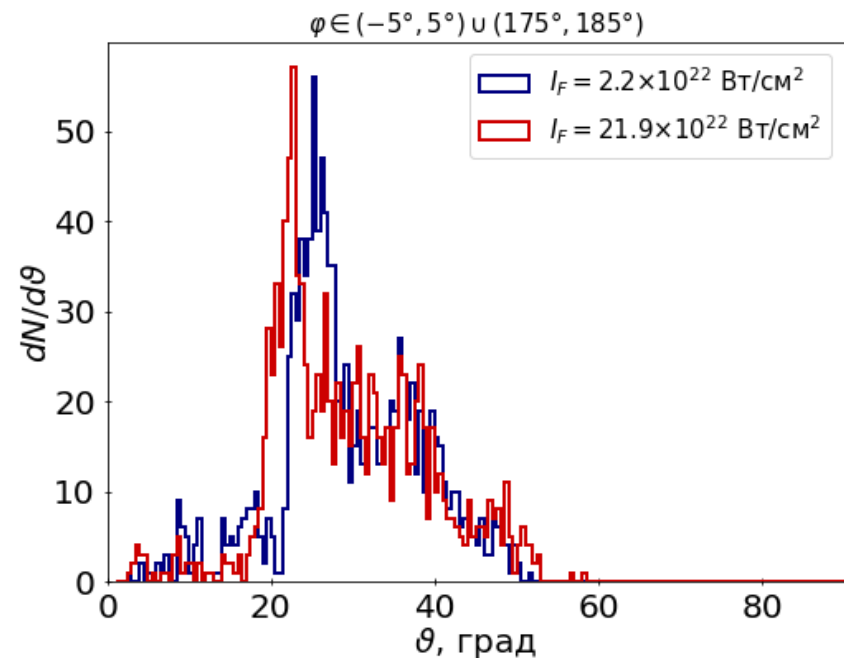
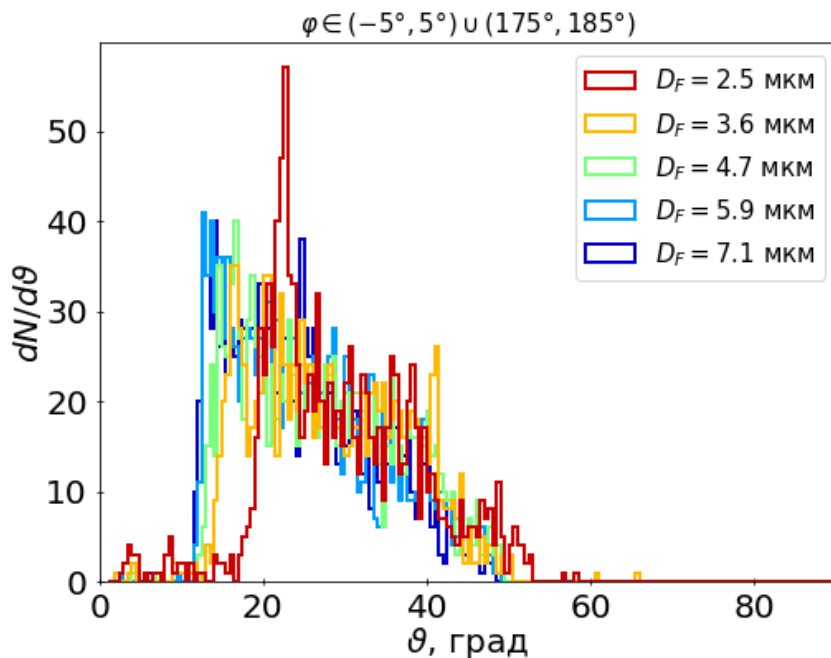


Угловые спектры электронов с энергиями 1 – 20 МэВ

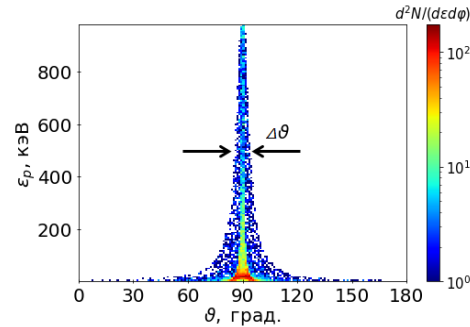


Заданная мощность лазерного импульса (15 ПВт)

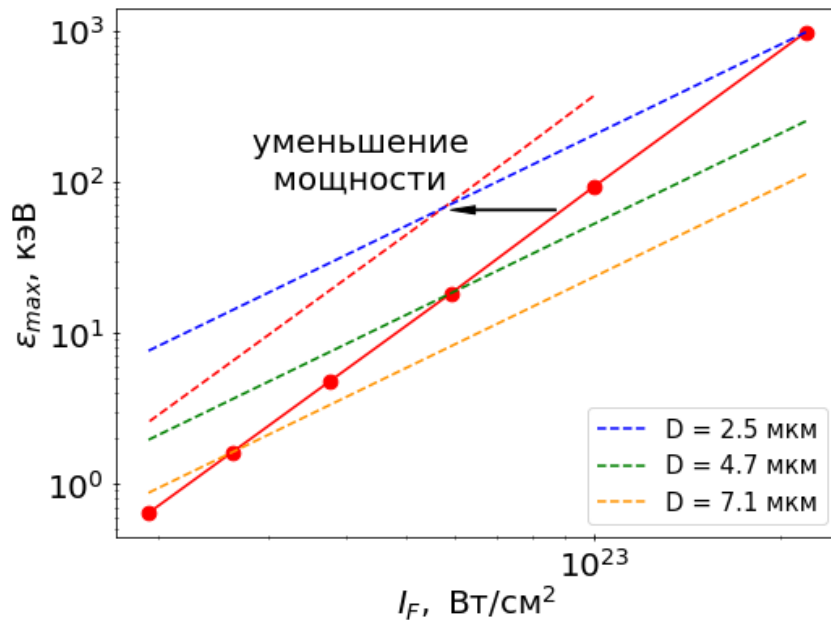
Заданный диаметр (2.5мкм)



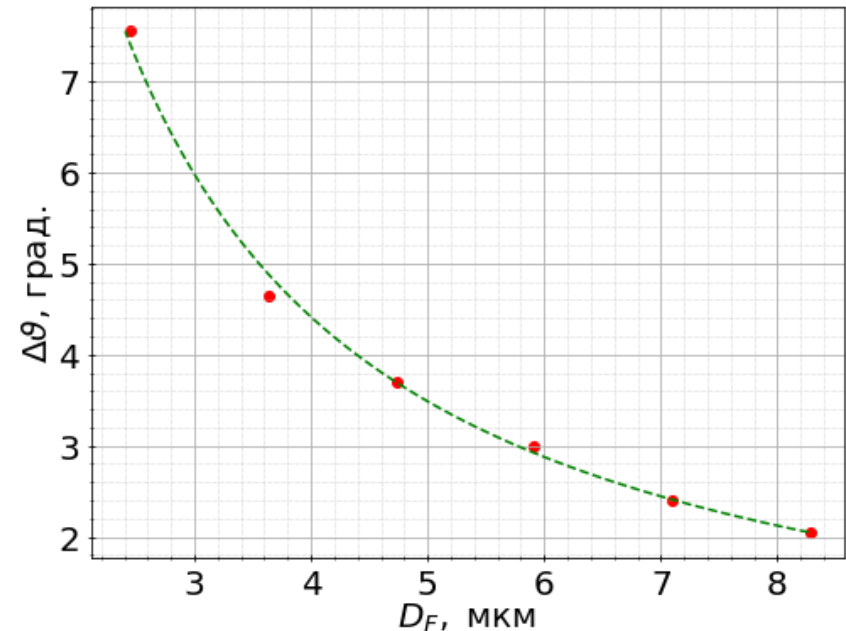
Характеристики протонных спектров



Энергии отсечки протонных спектров

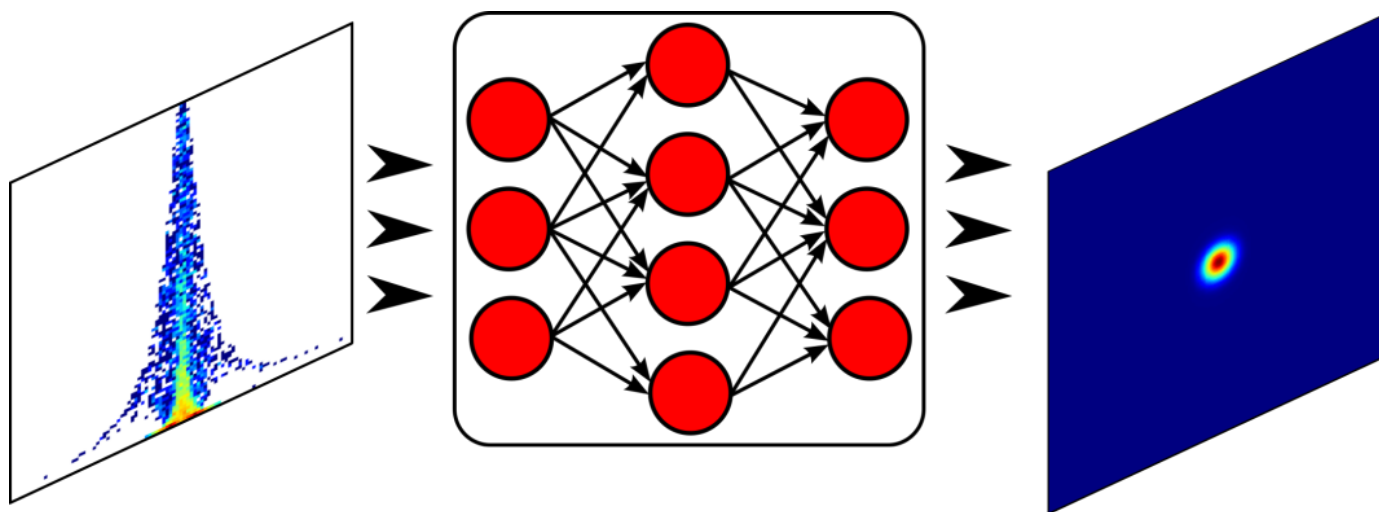


Угловая ширина энергетических спектров



сплошная линия – 15 ПВт,
пунктирная линия – 3.75 ПВт

Принципиальная схема восстановления пространственного профиля лазерного импульса по спектрально-угловым распределениям частиц при помощи нейронной сети



Зависимость формы распределений частиц от пространственных характеристик лазерного импульса → восстановление фокального распределения лазерного импульса

Требования к эксперименту

- Плотность газовой струи (малость сил взаимодействия между частицами): $< 10^{18} \text{см}^{-3}$
- Эксперимент с оценкой угловой ширины протонных спектров:
 $nl < 10^{15} \text{см}^{-2}$, где n - концентрация газа, l - толщина газовой струи, т.е. 10^{16}см^{-3} для струи 1 мм
- Детектирование частиц:
 - полупроводниковые детекторы матричного типа (Medipix TimePix2&3) – высокая чувствительность к одиночным частицам, энергетическое разрешение 10%, но использование защитного фильтра повышает минимальную энергию детектирования
 - позиционно-чувствительный детектор (времяпролетные спектрометры с микроканальной пластиной и люминофором)

Заключение

- измерение средней интенсивности по выстрелам: спектрально-угловые распределения как электронов, так и протонов
- измерение интенсивности в каждом выстреле: угловые распределения электронов с энергиями от 1 до 20 МэВ
- диапазоны энергий частиц:
 - электроны: до 150 МэВ
 - протоны: от 1 кэВ до 1 МэВ
- углы вылета частиц:
 - электроны: $< 40^\circ$
 - протоны: в узком конусе вдоль 90°

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

