

# Экспериментальное исследование режимов LWFA на лазерном комплексе PEARL

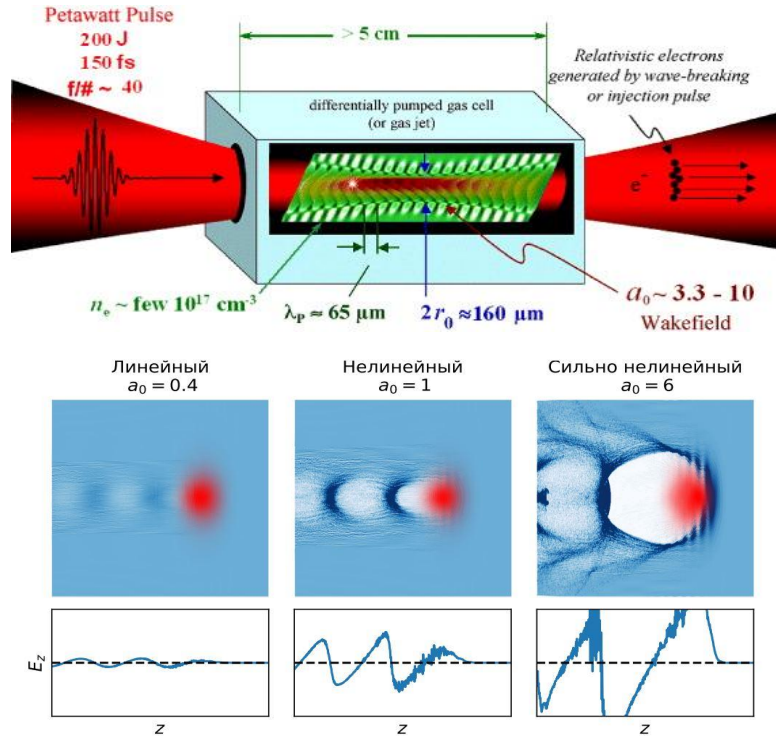
Перевалов С.Е., Бурдонов К.Ф., Котов А.В., Романовский Д.С., Соловьев А.А.,

Стародубцев М.В., Голованов А.А., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А., Коробейникова А.П.,

Кузьмин А.А., Шайкин И.А., Шайкин А.А., Яковлев И.В., Хазанов Е.А., Костюков И.Ю.

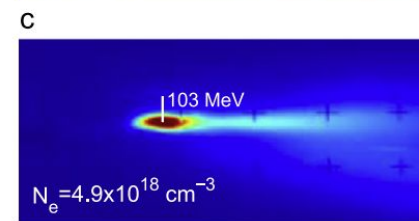
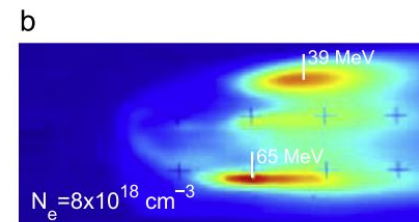
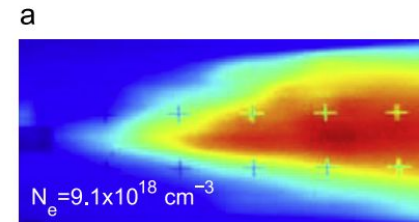
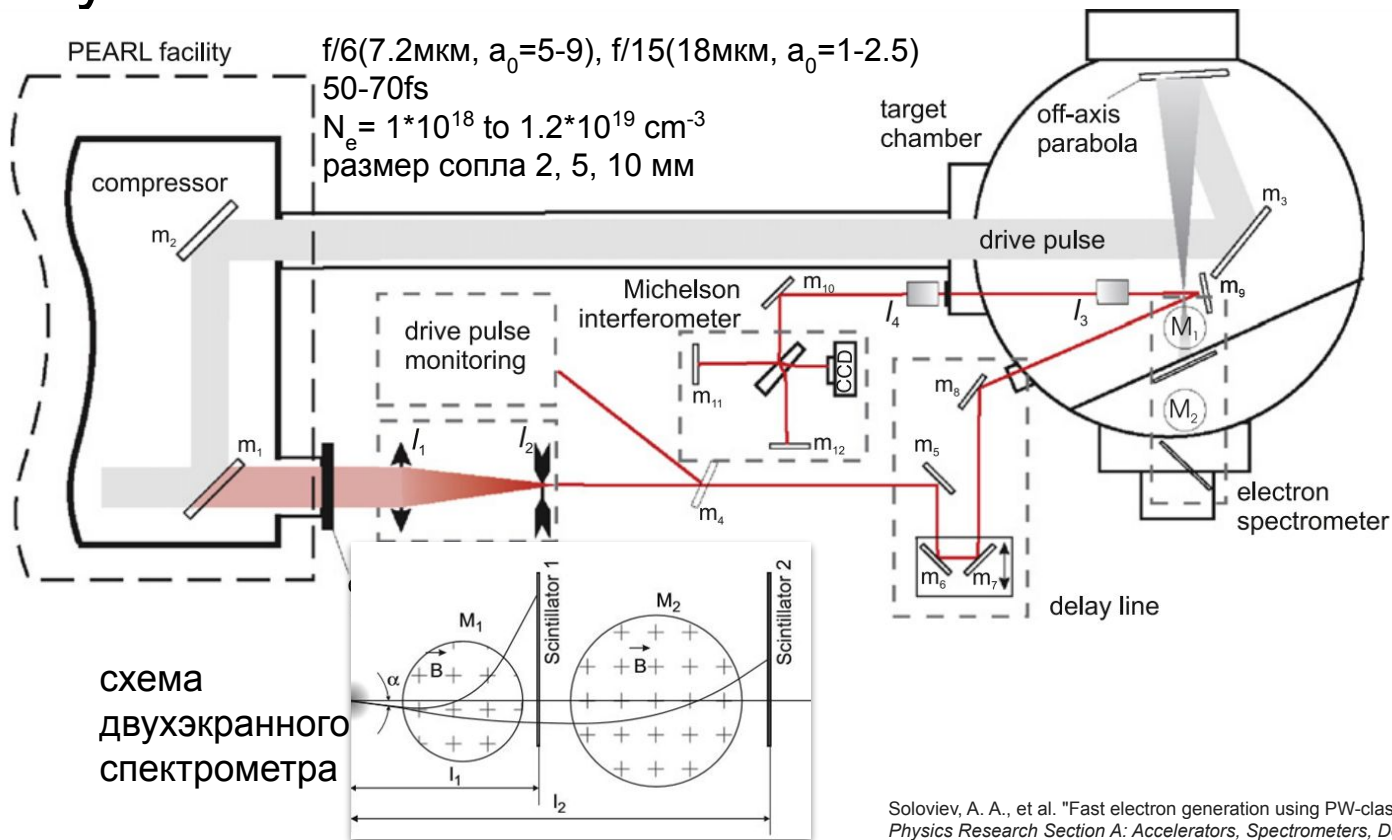
# LWFA?

- Мишень – газовая струя (давление газа порядка 50 атм) или газовая ячейка (давление газа порядка 0.5 атм)
- Предимпульс создает плазму, а основной импульс создает кильватерную волну – волну концентрации электронов
- В нее происходит инжекция или захват электронов
- Они разгоняются в поле волны, в выбранное время волну обрывают, а электроны продолжают движение
- Пучок с малым угловым размером



1. Kalmykov, Serguei Y., et al. "Numerical modelling of a 10-cm-long multi-GeV laser wakefield accelerator driven by a self-guided petawatt pulse." *New Journal of Physics* 12.4 (2010): 045019.
2. Голованов, Антон Александрович. "Сильно нелинейные кильватерные ускоряющие структуры в неоднородной плазме." (2019)

# Ускорение из газовой струи: экспериментальная установка



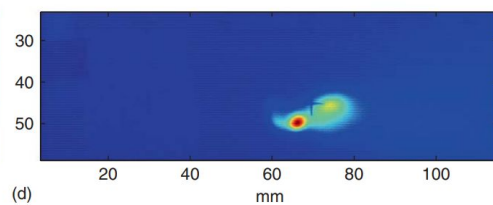
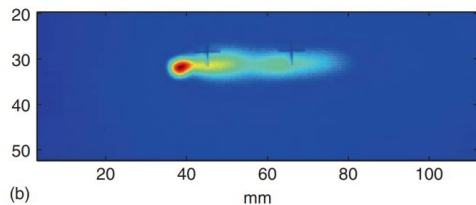
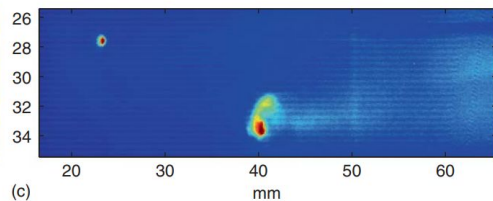
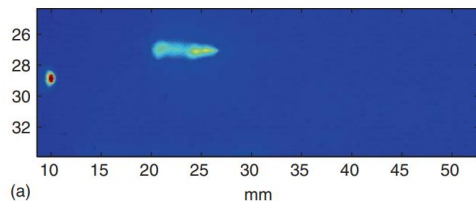
характерное свечение экранов (второй экран)

# Ускорение из газовой струи: процедура восстановления спектров

свечение экранов имеет структуру гауссовой функции по  $E$  и по углу

270МэВ (несколько горбов)

190МэВ (один горб)

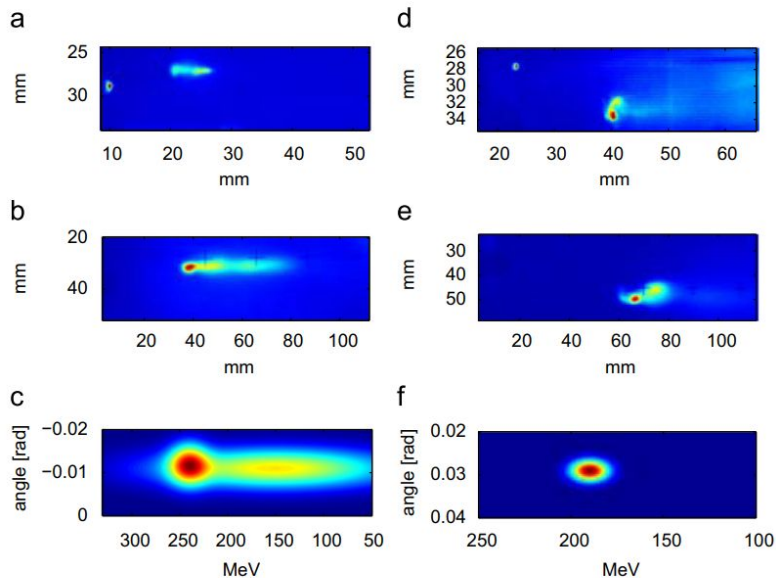


Модель спектра

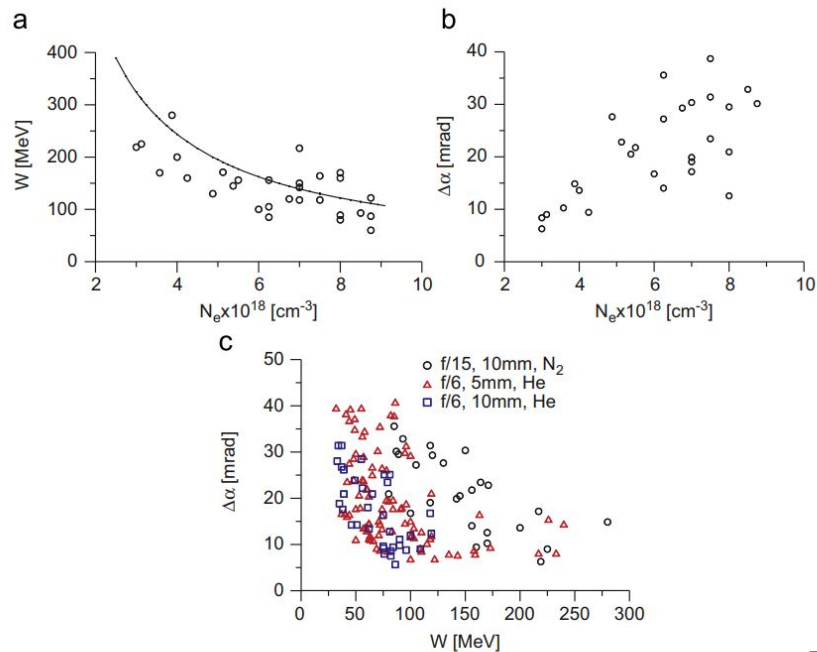
$$\frac{dN_{mod}(\alpha, w)}{dw d\alpha} = c_l \exp\left(-\frac{(\alpha - \alpha_1)^2}{\Delta\alpha_1^2}\right) \times \left\{ W_1 \exp\left(-\frac{(w - w_1)^2}{\Delta w_1^2}\right) + W_2 \exp\left(-\frac{(w - w_2)^2}{\Delta w_2^2}\right) \right\}$$

# Ускорение из газовой струи: восстановленные спектры максимальные энергии

первый экран



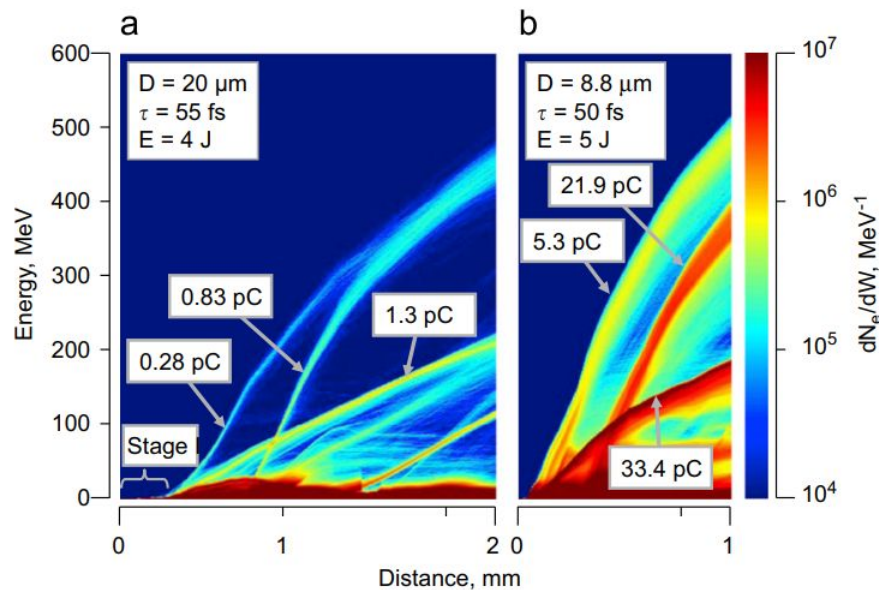
второй экран



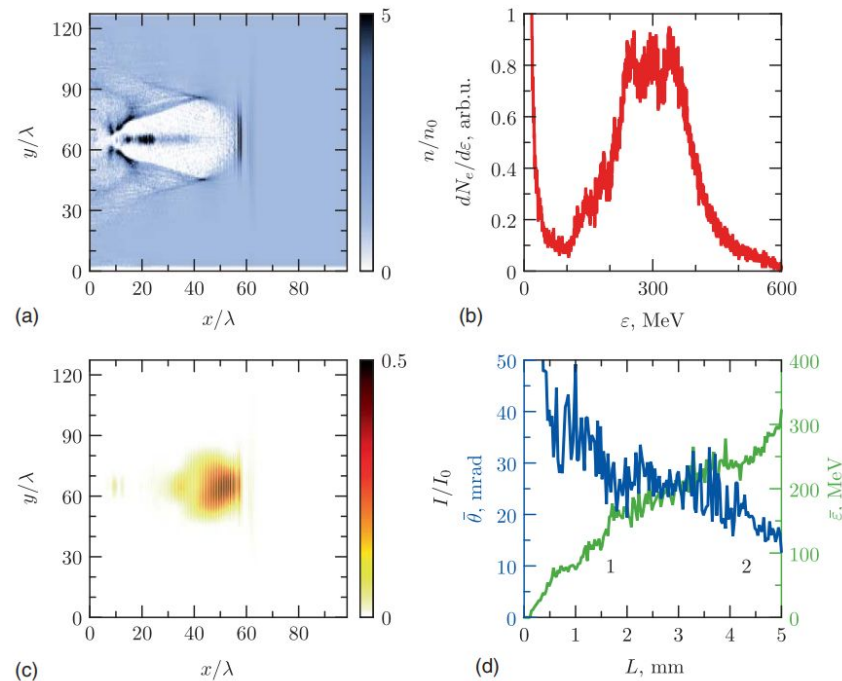
(восстановление методом монте-карло)

# Ускорение из газовой струи: моделирование

Энергетическое распределение как функция длины взаимодействия



pic-моделирование с параметрами: 9.8 J, 50 fs, размер пятна 13  $\mu\text{m}$ , концентрация  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . длина взаимодействия 5.1 mm



# Несо согласованный режим??

- **Согласованный**

- Поперечный размер драйвера согласован с плазменной длиной волны

- **Несо согласованный**

- Поперечный размер драйвера не согласован с плазменной длиной волны

Условие согласования:

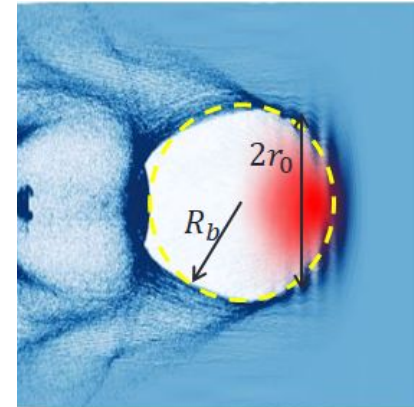
$$k_p R_b \approx k_p r_0 = 2\sqrt{a_0}$$

Приращение энергии электрона в кильватерной волне при прохождении длины дефазировки

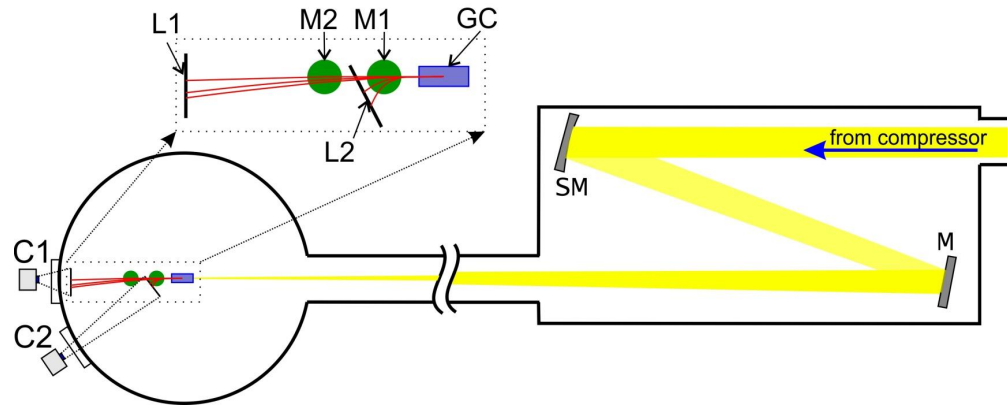
- $\Delta E \approx \frac{2}{3} mc^2 \left( \frac{\omega_l}{\omega_p} \right)^2 a_0$

Приращение энергии пропорционально квадрату размера пятна:

$$\Delta E \sim r_0^2$$



# Экспериментальное исследование несогласованного режима: схема эксперимента



Длительность импульса  $\approx 60$  фс, энергия  $\approx 20$  Дж, 910 нм

Фокусное расстояние сферического зеркала 8,3 метров (SM, f/46)

Газ – гелий, давление 0.1 – 0.5 атм

Длина газовой ячейки 0.2-3 см (GC)

C1, C2 – CCD-камеры

M1, M2 – дипольные магниты (0.6 Т)

L1, L2 – экраны

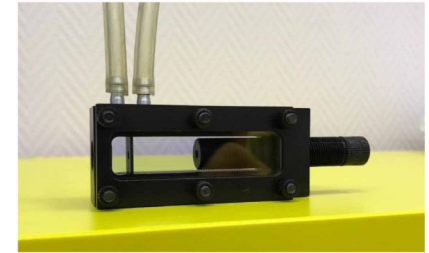
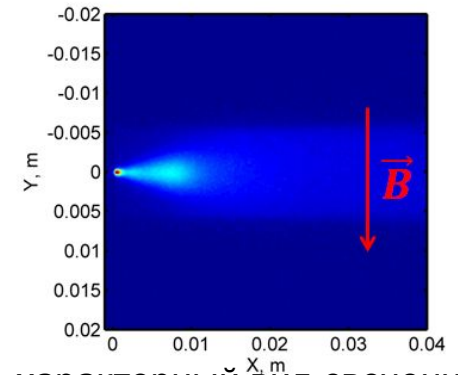


Фото газовой ячейки.



характерный вид свечения экрана

Perevalov, S. E., et al. "Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 62.9 (2020): 094004.



# Экспериментальное исследование несогласованного режима: процедура восстановления спектров

Интенсивность засветки можно представить в виде интеграла:

$$I(x, y) = \int_0^{E_c} A_x(x, E) A_y(y, E) B(E) dE,$$

$A_x(x, E)$  и  $A_y(y, E)$  можно представить в виде

$$A_x(x, E) = \exp\left\{-\frac{(\varphi(x) - \varphi_0(E))^2}{2\sigma(E)^2}\right\},$$

$$A_y(y, E) = \exp\left\{-\frac{\theta(y)^2}{2\sigma(E)^2}\right\}.$$

где  $\varphi_0(E)$  – угол отклонения электрона с энергией  $E$  магнитом относительно оптической оси системы,  $\sigma(E)$  – измеренный угловой спектр.

Тогда при фиксированном  $y$

$$I(x) = \int_0^{E_c} \exp\left\{-\frac{(\varphi(x) - \varphi_0(E))^2}{2\sigma(E)^2}\right\} B(E) dE.$$

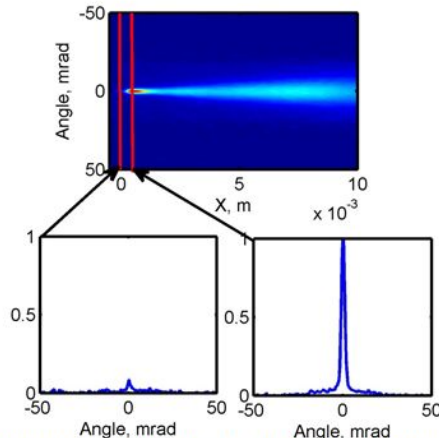
При фиксированной энергии интеграл есть модельная функция, которая определяет распределение интенсивности для электронов с конкретной энергией. Тогда раскладывая профиль интенсивности по таким функциям, подбирая коэффициенты  $B(E)$ , путем минимизации разницы между искомым профилем интенсивности  $I(B)$ ,  $x$  и измеренным  $I_0(x)$  в эксперименте

$$N(B(E)) = \int |I_0(x) - I(B, x)| dx,$$

найдем искомый спектр

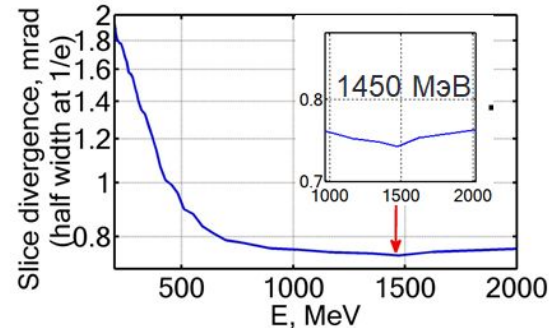
# Экспериментальное исследование несогласованного режима: определение энергии отсечки

- В эксперименте максимальная энергия электронов определялась как энергия электронов, которые возможно выделить выше уровня фоновой засветки экрана



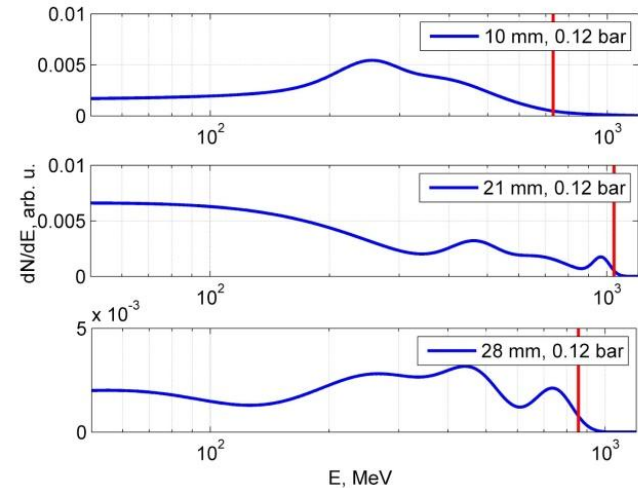
Свечение экрана можно разложить на фоновую засветку (широкая) и засветку пучком (узкая)

Измеряя ширину узкой засветки, можно восстановить угловое распределение. При этом «провал» происходит на энергии электронов, которые еще можно выделить на фоне низкоэнергетичных. Это и есть энергия отсечки



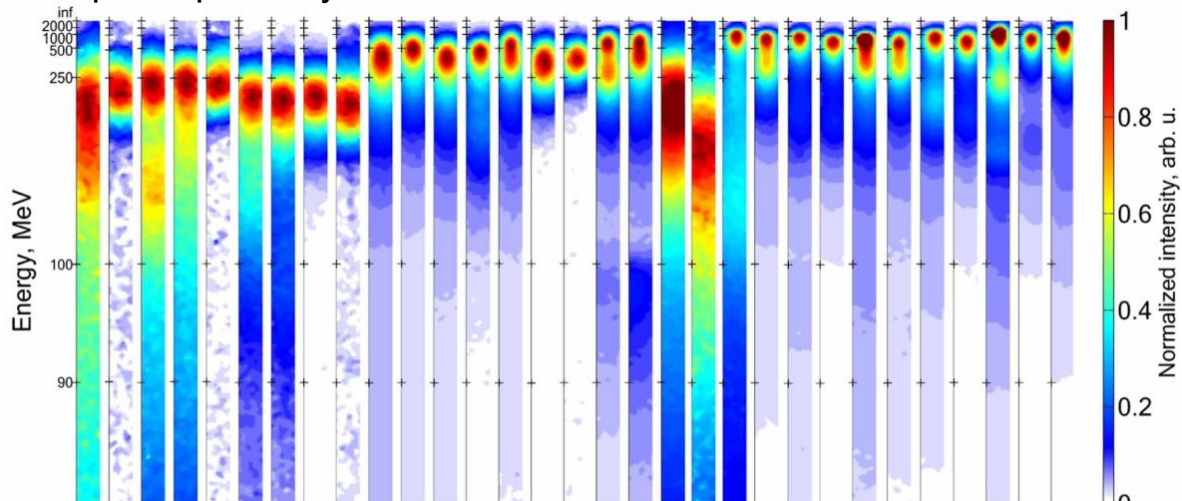
# Экспериментальное исследование несогласованного режима: примеры восстановленных спектров

- Примеры спектров для нескольких параметров газовой ячейки. Во всех случаях наблюдается несколько «горбов», это связано с сложной динамикой, возможно, это несколько последовательных инжекций
- Красная линия проведена через энергию отсечки

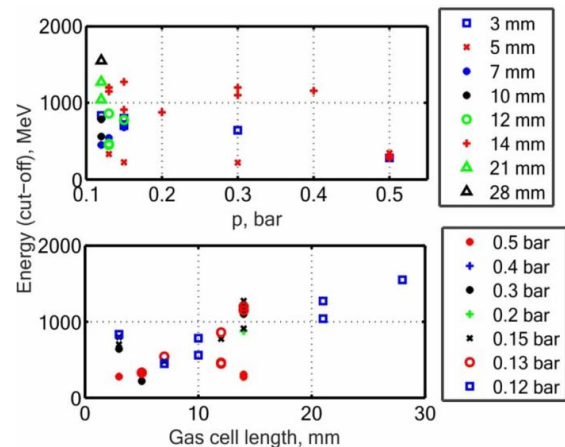


# Экспериментальное исследование несогласованного режима

Обработанные снимки экранов и соответствующие параметры импульса и мишени

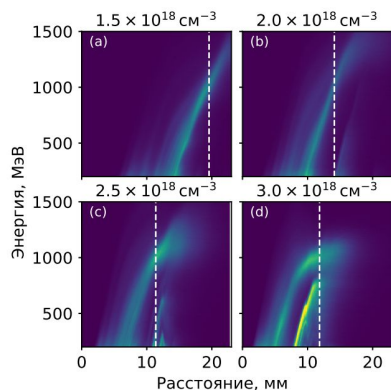


| L, mm  | 3    |      |      | 5    |      |      | 7    |      |      | 10   |      | 12   |      |      | 14   |      |      | 21   |      | 28   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| P, bar | 0.5  | 0.3  | 0.15 | 0.13 | 0.12 | 0.5  | 0.3  | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.5  | 0.4  | 0.3  | 0.2  | 0.15 | 0.13 | 0.12 | 0.12 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| E, J   | 13.0 | 19.5 | 15.1 | 18.8 | 17.0 | 14.6 | 13.7 | 13.4 | 16.1 | 15.4 | 16.4 | 16.0 | 17.4 | 18.7 | 13.7 | 13.6 | 14.0 | 11.8 | 11.1 | 13.3 | 14.4 | 19.0 | 13.1 | 17.4 | 14.4 | 12.5 | 16.7 | 15.0 | 15.8 | 15.3 | 13.5 |



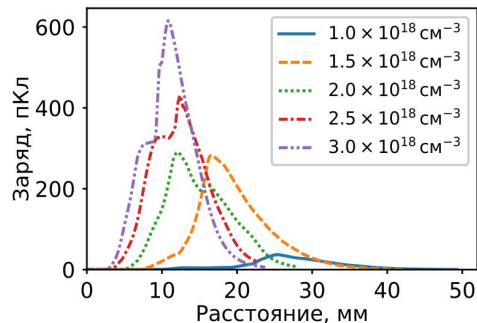
# Экспериментальное исследование несогласованного режима: моделирование

Зависимости энергии от длины взаимодействия



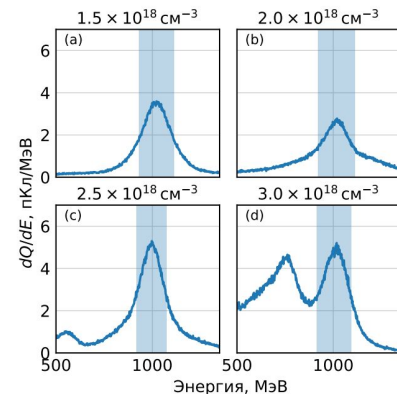
- Зависимость параболическая, при больших концентрациях несколько инъекций
- Спектры обрываются из-за истощения энергии драйвера

Зависимости заряда от длины взаимодействия



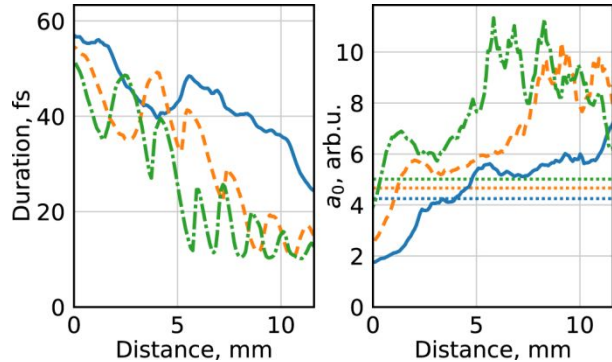
- Видно, что есть оптимальная длина взаимодействия.
- Тенденции к росту заряда с увеличением концентрации и уменьшению заряда с увеличением длины взаимодействия аналогичны наблюдаемым в эксперименте

Оптимальные спектры электронов

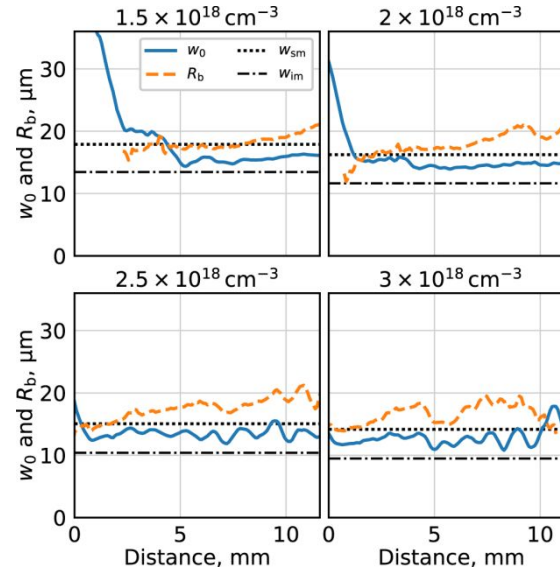


- Оптимальность с точки зрения наименьшего разброса по энергии.
- Спектры имеют много сходств с спектрами в эксперименте

# Экспериментальное исследование несогласованного режима: моделирование динамики импульса

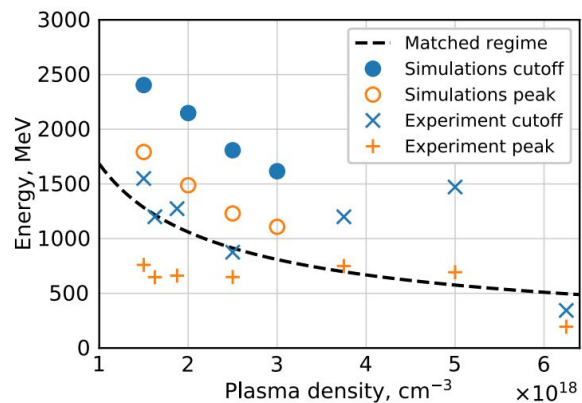


Динамика длительности и амплитуды при концентрациях  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (сплошные линии),  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (пунктирные линии),  $2.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (штрих-пунктирные линии)



Динамика размера фокального пятна и радиуса плазменной полости при разных концентрациях. w<sub>0</sub> - радиус пятна по уровню 1/e<sup>2</sup>, R<sub>b</sub> - радиус полости

# Сравнение результатов



| установка                   | длина волны, мкм | мощность, ТВт | фокусировка | радиус пятна, мкм | концентрация, $\times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ | плазменная длина волны, мкм | длина взаимодействия, мм | теор. оценка макс. энергии, ГэВ | эксп. макс. энергия, ГэВ |
|-----------------------------|------------------|---------------|-------------|-------------------|--|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| PEARL 2011 <sup>[1]</sup>   | 0,91             | 180           | f/15        | 11.5              | 4  | 16.5                        | 4                        | 0.7                             | 0.3                      |
| Astra Gemini <sup>[2]</sup> | 0,8              | 215           | f/40        | 31.6              | 2.5  | 20.9                        | 16                       | 1.2                             | 1.6                      |
| PEARL 2020                  | 0,91             | 216           | f/40        | 35.2              | 3.6  | 17.4                        | 14                       | 0.78                            | 1.2                      |

1. Soloviev A A et al 2011 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 653 35–41

2. Poder K 2016 Characterisation of self-guided laser wakefield accelerators to multi-GeV energies PhD thesis Imperial College London

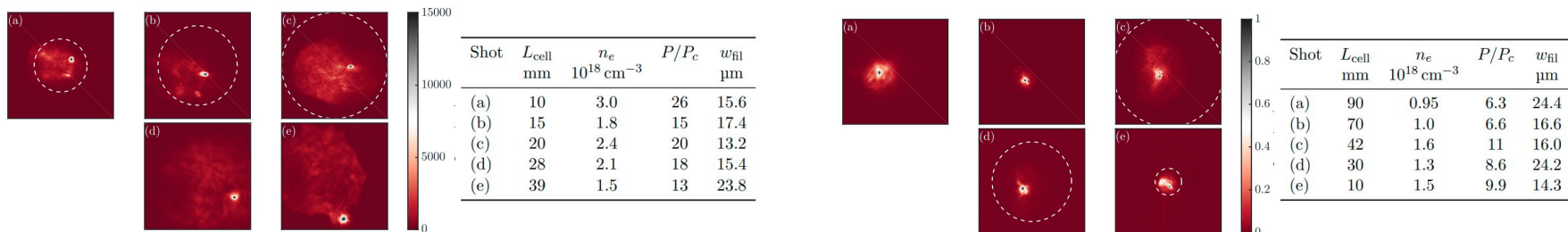
# Возможные причины преимущества несогласованного режима

## 1. Автоматическое самосогласование - "adjusted- $a_0$ model"

$$w_{0-m} = 2\sqrt{a_0} \frac{c}{\omega_{pe}} = R_{\text{bubble}} \quad \Delta\mathcal{E} [m_e c^2] \simeq \frac{2}{3} a_0 \left( \frac{n_c}{n_0} \right) \quad a_0(\text{adj.}) = a_{0-\text{inc}} \Gamma = a_{0-\text{inc}} \frac{W_0}{w_{0-m}}$$

[ Sahai, Aakash A. "Strongly Mismatched Regime of Nonlinear Laser-Plasma Acceleration: Optimization of Laser-to-Energetic Particle Efficiency." *IEEE Transactions on Plasma Science* 47.6 (2019): 2847-2858.]

## 2. Подавление образования гало вокруг пучка



[Poder, Kristijan. *Characterisation of self-guided laser wakefield accelerators to multi-GeV energies*. Diss. Imperial College London, 2016.]

## 3. Возможно, лучшая инжекция из-за сложной динамики импульса на входе



# Основные результаты работы

- Проведено исследование несогласованного режима ускорения электронов на лазерном комплексе PEARL
- В эксперименте получены пучки с максимальной энергией до 1.5 ГэВ и угловым размером порядка 2 мрад, характерный вид спектров согласуется с результатами моделирования.
- Экспериментально показана эффективность несогласованного режима по сравнению с согласованным.