

## Введение

Лазерный импульс проектируемой установки XCELS (Саров) позволит ускорить электронный сгусток с зарядом 50 пКл до энергии 100 ГэВ с энергоразбросом 0.7%. Для этого требуется создать плазменный канал с длиной 70 м, характерным радиусом 200 мкм и плотностью плазмы на оси  $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Численно оптимизировать параметры ускорителя удается с помощью с помощью кода, использующего квазистатическое приближение, с описанием лазерного импульса через его огибающую.

## Постановка задачи

Пусть лазерный импульс с энергией  $Q_0 = 400 \text{ Дж}$  движется вдоль оси  $z$  и линейно поляризован вдоль оси  $x$ , причем  $x$ -компонента его вектора поляризации определяется безразмерной амплитудой  $a$ :

$$A_x = \frac{m_e c^2}{e} \text{Re} (a(z, \xi) e^{ik_0 \xi}), \quad a_0 = \frac{2e\lambda}{\pi m_e c^2 r_0} \sqrt{\frac{Q_0}{\sigma_z \sqrt{\pi}}}$$

$$a = a_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2} - \frac{(\xi - 3\sigma_z)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Для предотвращения дифракционного распыления импульс распространяется в согласованном плазменном канале с радиальным профилем плотности

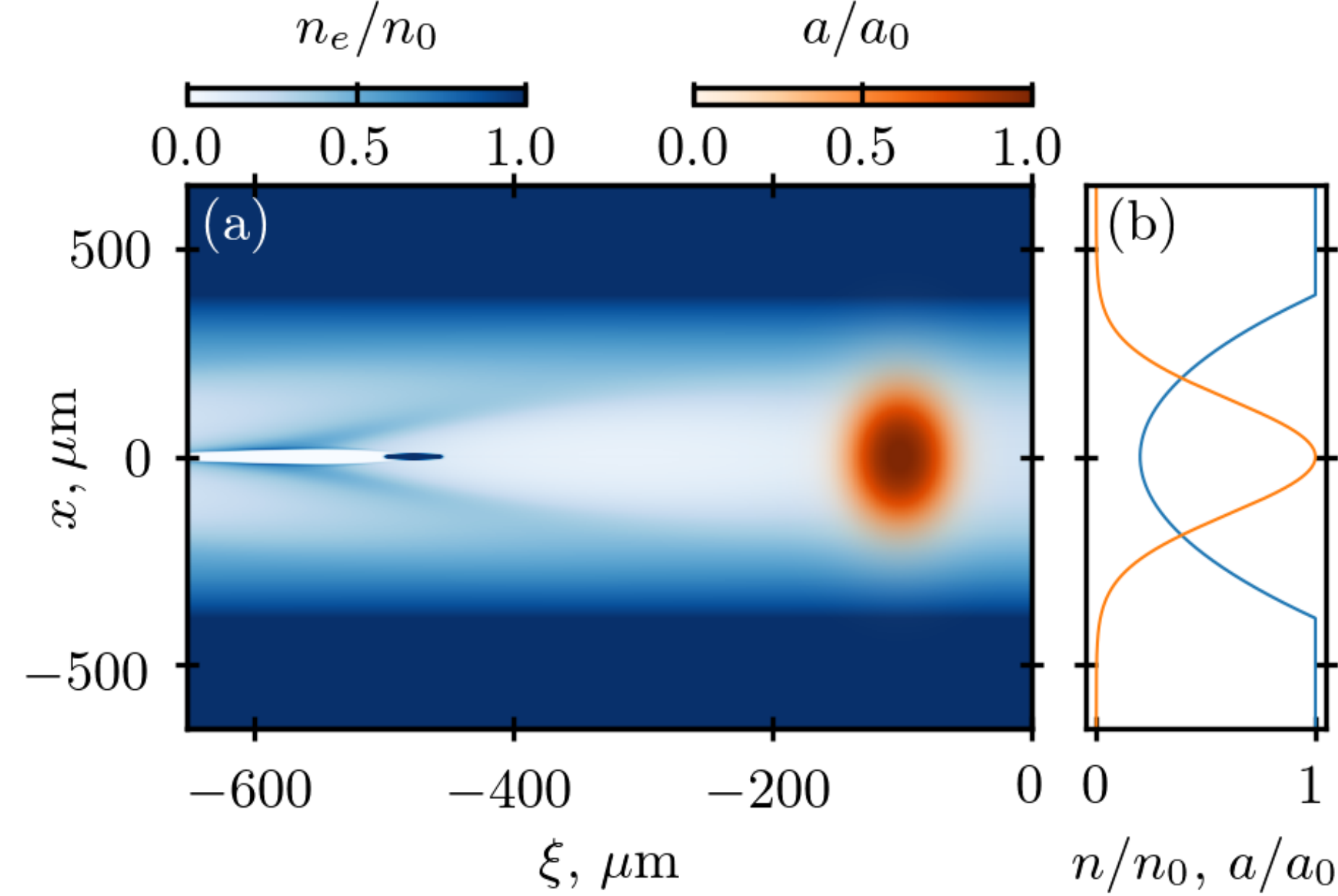
$$n(r) = \begin{cases} n_c + r^2/(\pi r_c r_0^2), & r < 2r_0, \\ n_c + 4/(\pi r_c r_0^2), & r \geq 2r_0, \end{cases}$$

$$n_0 \equiv n(2r_0), \quad k_p^{-1} = c/\omega_p(n_0) \approx 43.4 \text{ мкм}$$

В возбужденную кильватерную волну инжектируется электронный сгусток. Фиксируем начальные параметры электронного сгустка:

заряд **50 пКл**, начальная энергия **300 МэВ**, нормализованный эмиттанс **2 мм мрад**,  $\sigma_z = 2.25 \text{ мкм}$  (согласован с фокусирующей силой ионного фона)

Подбираем длину  $\sigma_z$  и положение по  $\xi$ , в кильватерной волне

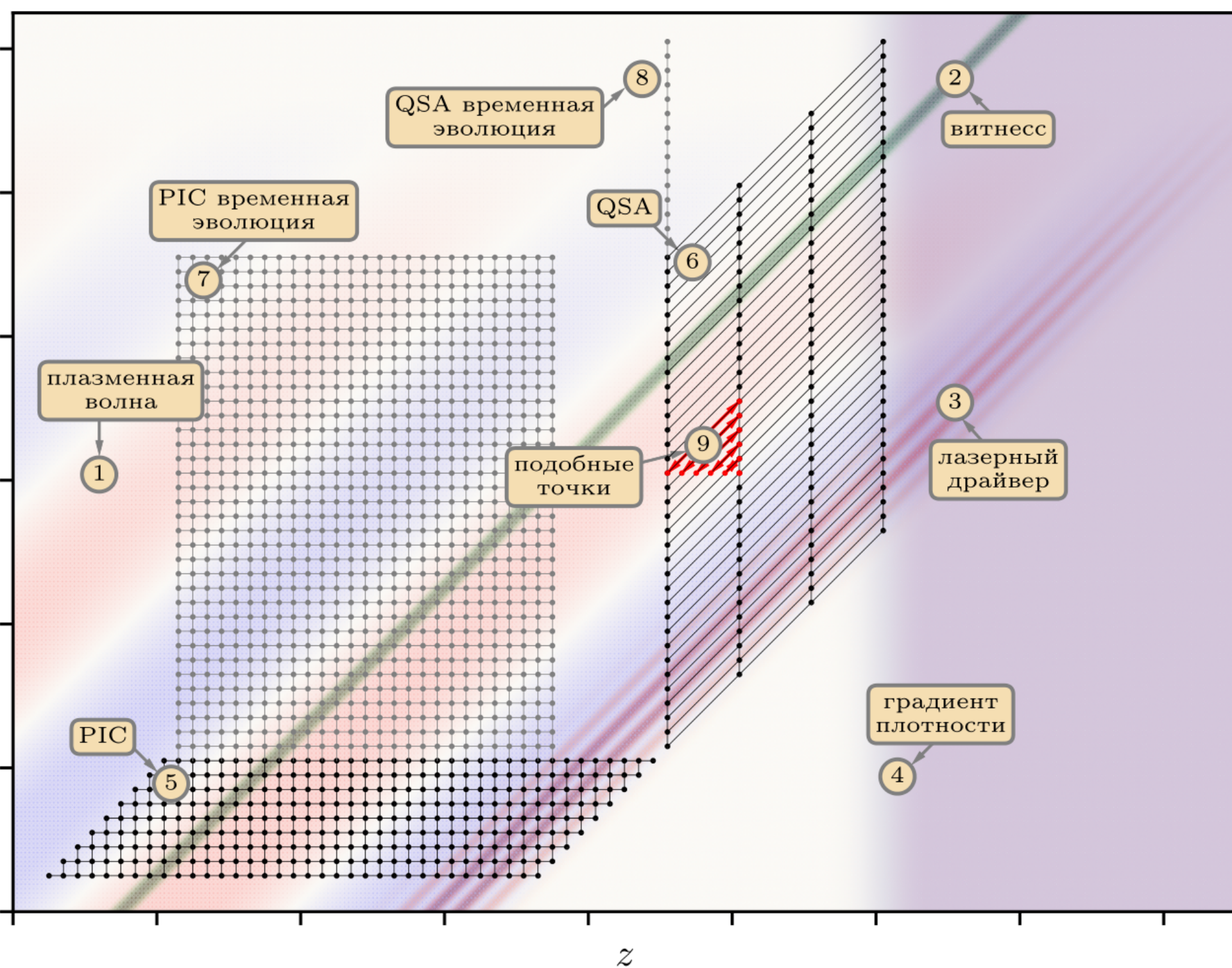


Параметры оптимального варианта:  
 $n_c = 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sigma_z = 34 \text{ мкм}$ ,  
 $r_0 = 194 \text{ мкм}$ ,  $r_1 = 2r_0$ ,  $a_0 \approx 1.4$ .

Типичный расчет:  
 $\Delta\xi = 0.0005 k_p^{-1}$ ,  $\Delta r = 0.02 k_p^{-1}$ ,  
 $\Delta z = 250 k_p^{-1}$ ,  $r_{\text{max}} = 15 k_p^{-1}$ ,  
 $10(e) + 10(i)$  макрочастиц на  $\Delta r$ ,  
 $\sim 1000$  часов CPU на вариант.

Требуется выяснить, до какой энергии и с каким энергоразбросом можно ускорить электронный витнесс при условии сохранения его заряда в процессе ускорения.

## Квазистатическое приближение:



$$\xi = z - ct$$

Скорость счёта:  
 + Переход к огибающей: позволяет увеличить шаг по  $z$  и  $t$  в  $\omega_0/\omega_p$  раз.  
 + Переход к квазистатике: увеличение шага по  $z$  в  $\omega_0/\omega_p$  раз.  
 - Расчет истончившихся импульсов: уменьшение шага по  $\xi$  в  $\omega_0/\omega_p$  раз.

Итого:  
 ускорение в  $(\omega_0/\omega_p)^2 \approx 10^6$  по сравнению с полной моделью  
 = LCODE (2d)

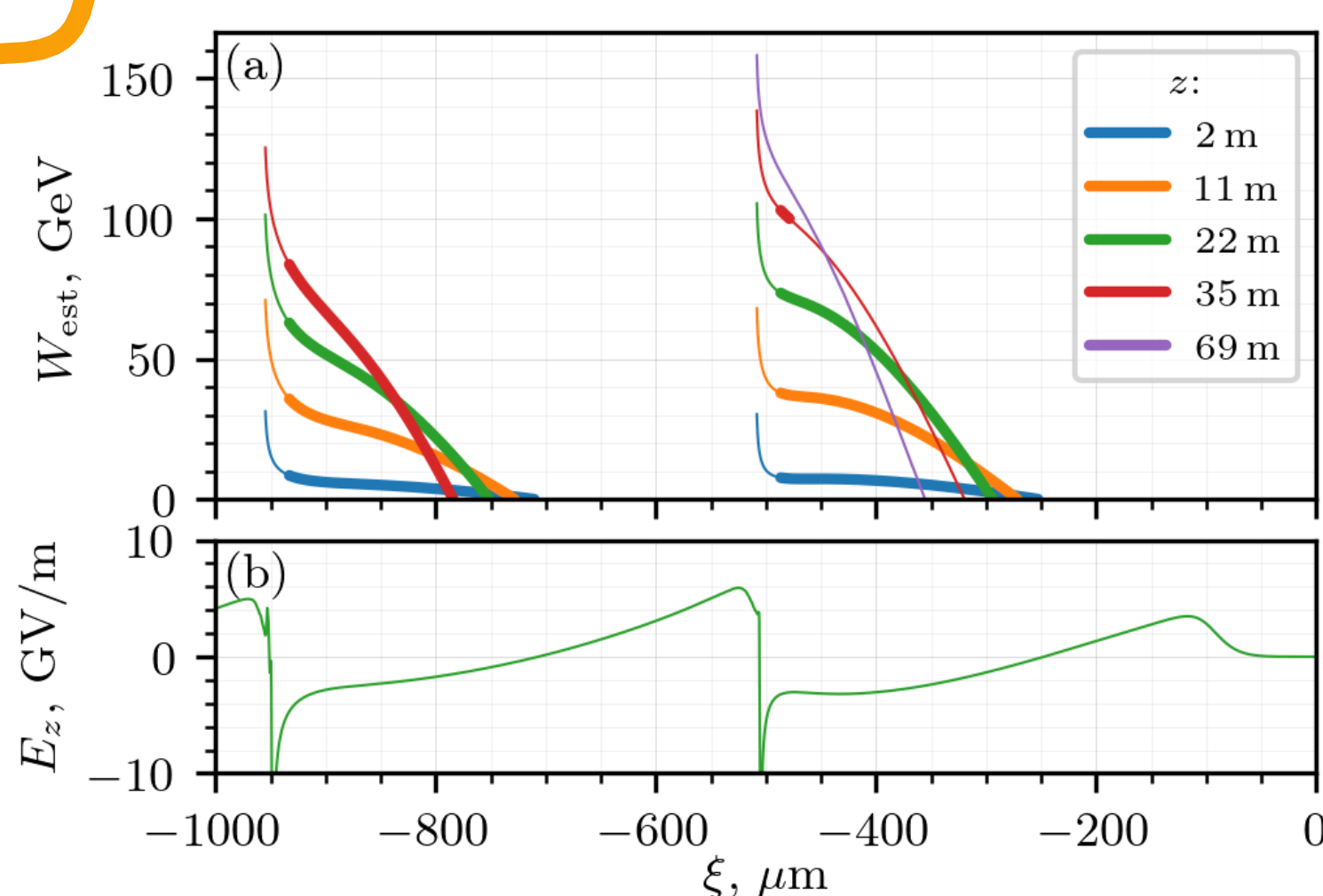
## Упрощённая оценка набора энергии

Оценим энергию, которую может набрать электрон, отстающий от лазерного драйвера, следующим интегралом:

$$W_{\text{est}}(\xi, z) = -e \int_0^z E_z(\xi, z') dz' + 300 \text{ МэВ}$$

Дополним эту оценку следующими ограничениями:  
 1) Дефокусировка (исключаем если в дефокусирующей фазе или энергия упала до нуля)  
 2) Конец каверны (ближе  $0.5 k_p^{-1}$  к концу каверны не учитываем, т.к. в особенности попасть сложно. Соответствует ошибке  $\sim 10\%$  в плотности плазмы)  
 3) Наполнение лазера (т.к. поперечное поле лазера испортит эмиттанс)

Следующий шаг: определим  $W_{\text{max}}$  как максимальную энергию среди электронов при  $z = 70 \text{ м}$  и посмотрим на её зависимость от параметров плазмы



Если подобрать продольную зависимость плотности плазмы, чтобы максимальное ускоряющее поле во второй каверне всегда достигало при одном значении  $\xi$ , то прирост энергии не более 20%, результат не стоит усилий.

## Параметрический поиск

**Низкая плотность плазмы** – мал темп ускорения, энергия не успевает выйти на максимум.

**Высокая плотность** – быстрое истощение и удлинение лазерного импульса, высокоэнергичные электроны оказываются в тормозящем поле, и туда же приходит задний край импульса.

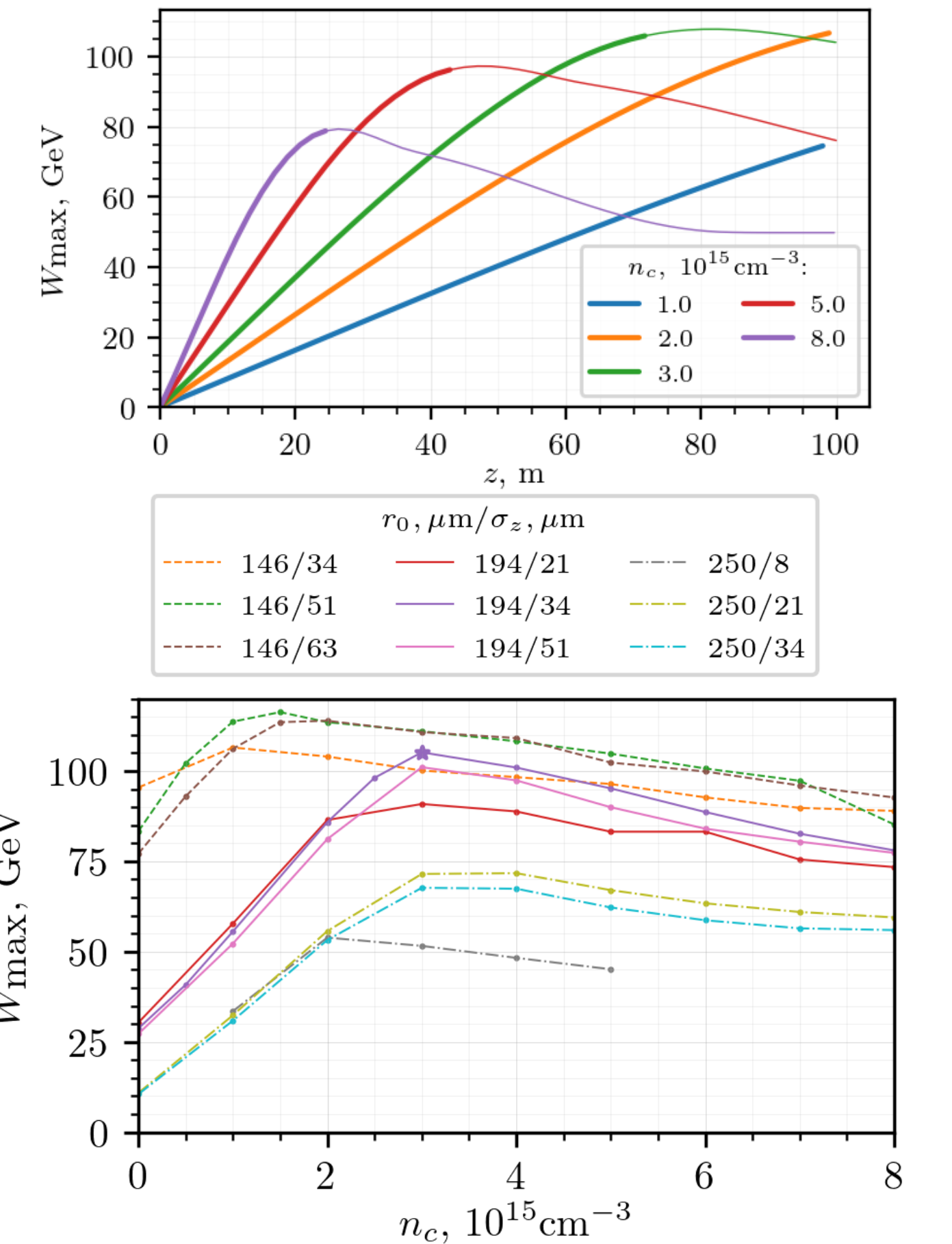
**Длинный импульс** – малый темп ускорения  
**Короткий импульс** – быстро истощается

Зависимость от радиуса оптимума не имеет, чем уже импульс, тем больше энергия электронов.

**Широкий импульс** – широкая волна (неэффективно), энергия электронов заметно меньше.

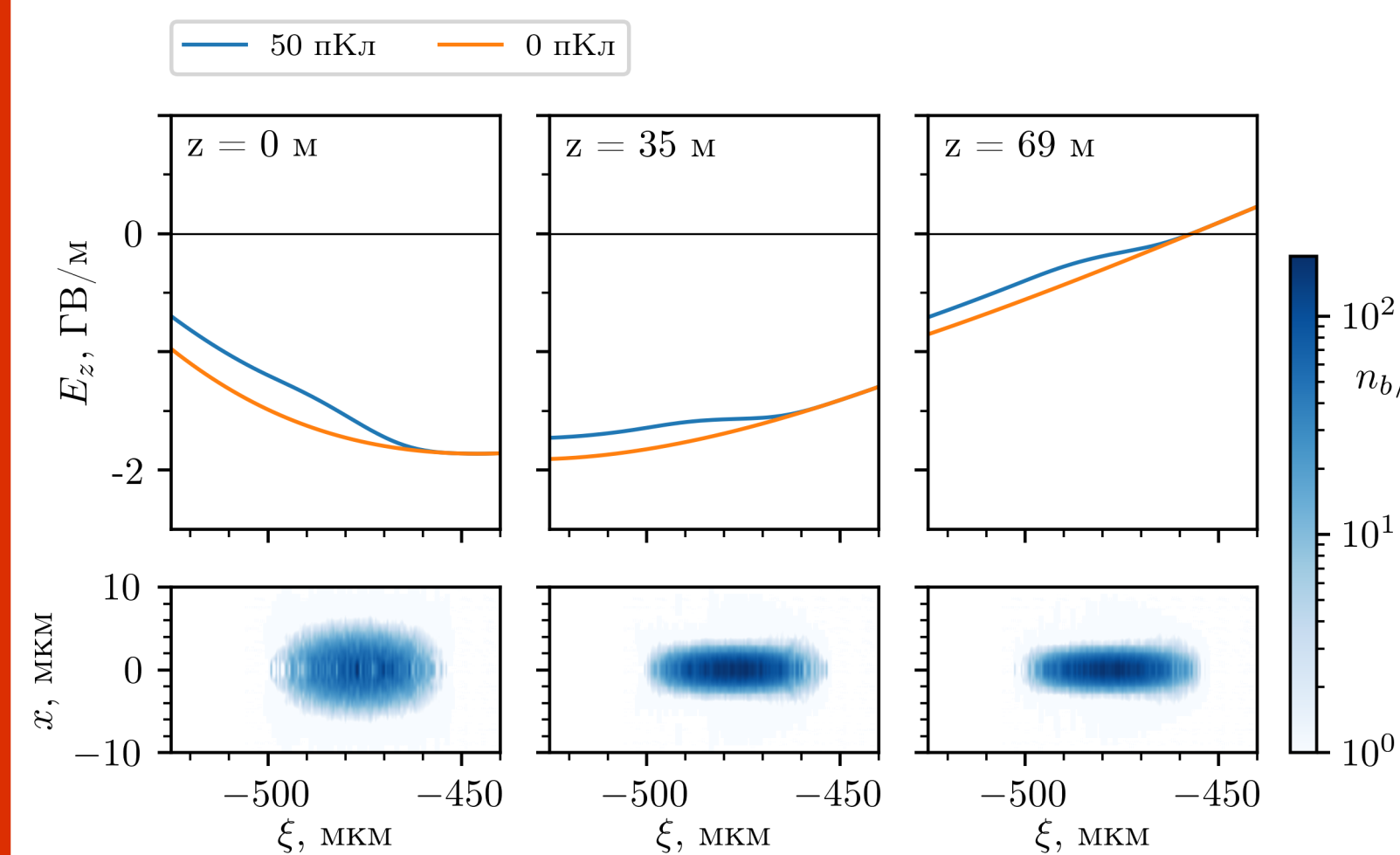
**Узкий импульс** – прирост энергии электронов непропорционально мал, и требуется очень глубокий канал (сложно).

Нашли (выбрали) оптимум. Показан звездочкой :)



## Уточнение положения электронного сгустка

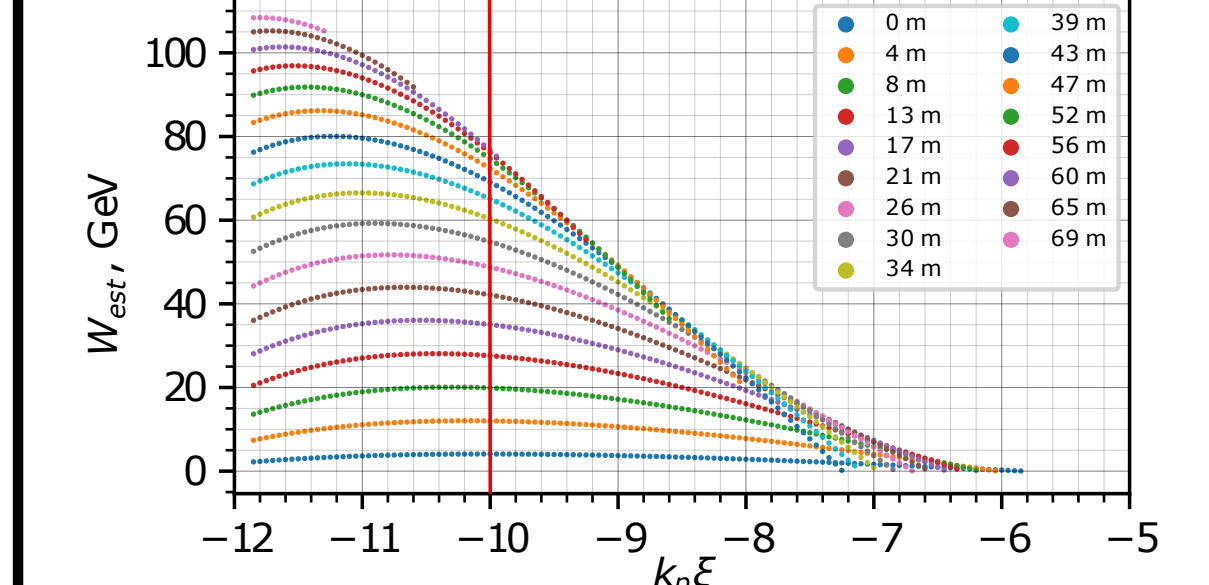
В реальном мире электронный сгусток своим зарядом будет искажать поле кильватерной волны, этот эффект называется **beam-loading**. Поэтому для каждого положения или размера сгустка проводится отдельный расчёт.



Можно считать короткое окно-продолжение (длиной с витнесс) и взять  $\Delta\xi = 0.01 k_p^{-1}$  (в этом месте лазера нет)

Теперь расчёт занимает  $\approx 10 \text{ CPU часов}$

Набор энергии в оптимальном варианте:



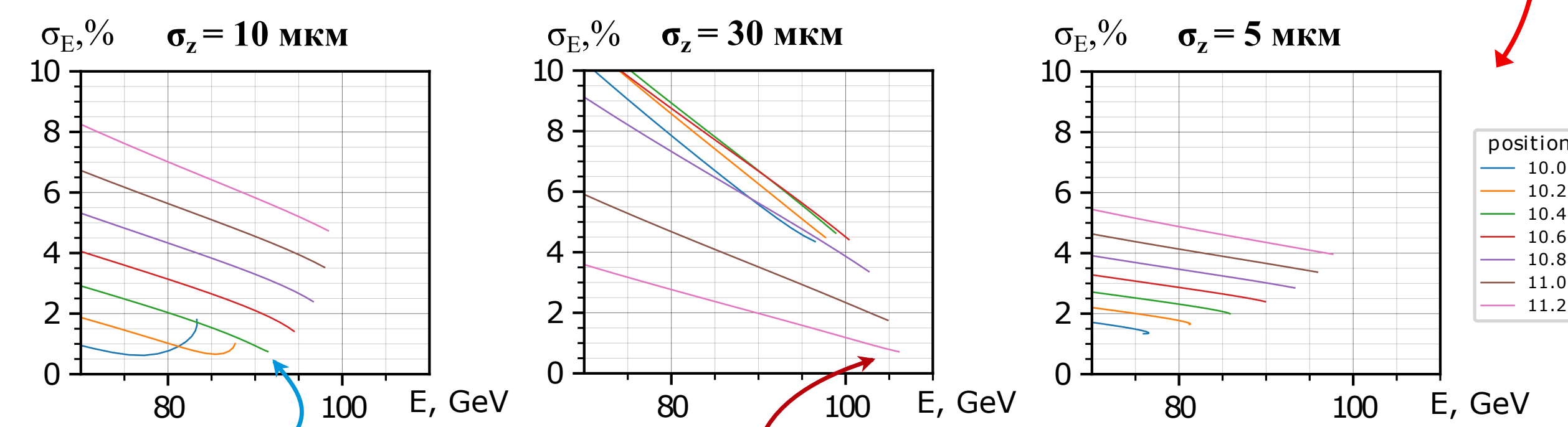
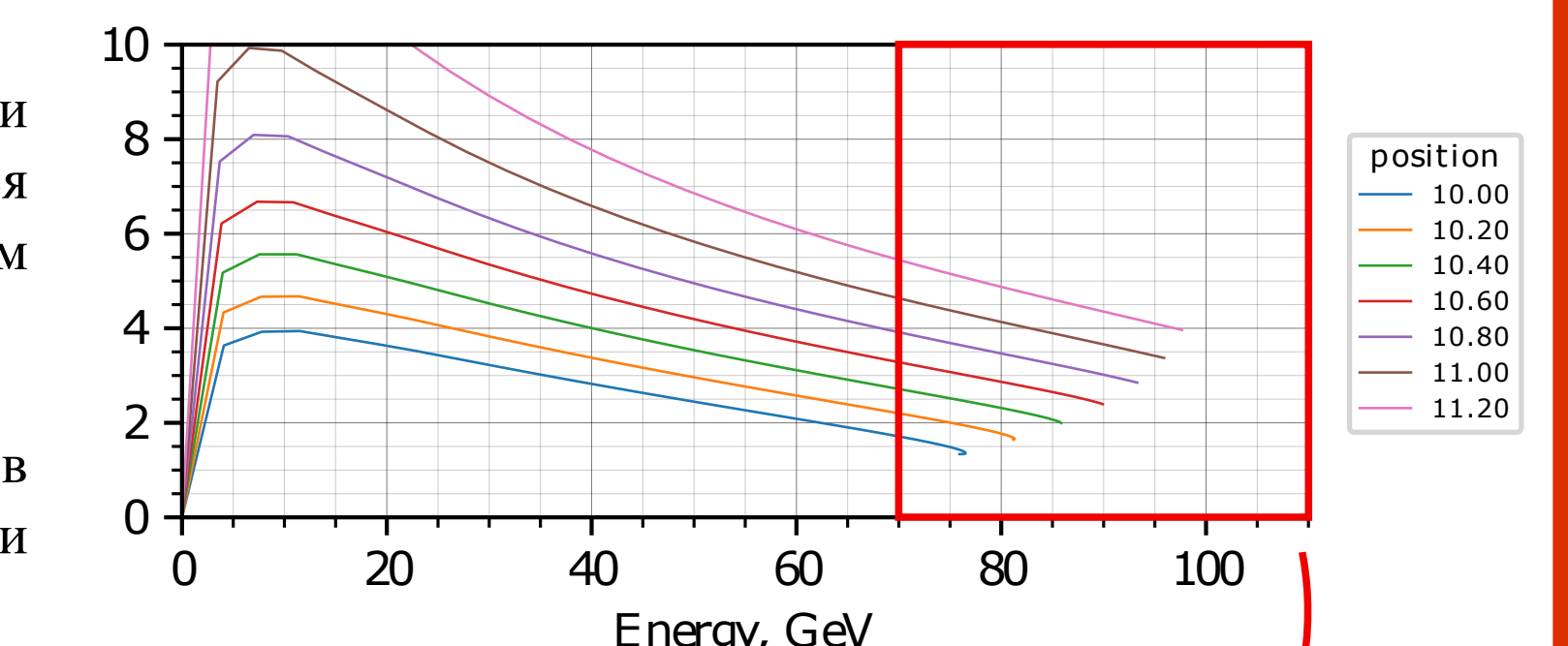
Витнесс пробуем сажать в ускоряющую волну после  $10 k_p^{-1}$  от начала окна моделирования (красная линия)

## Анализ полученных данных

Параметрический поиск проводится путём серии запусков. Выбор неоднозначен - приходится выбирать между большей энергией и меньшим энергоразбросом.

Оказалось, что для рассматриваемых параметров эмиттанс увеличивается в начале в 1.5 раза и больше не меняется

Зависимость энергоразброса (в %) от энергии

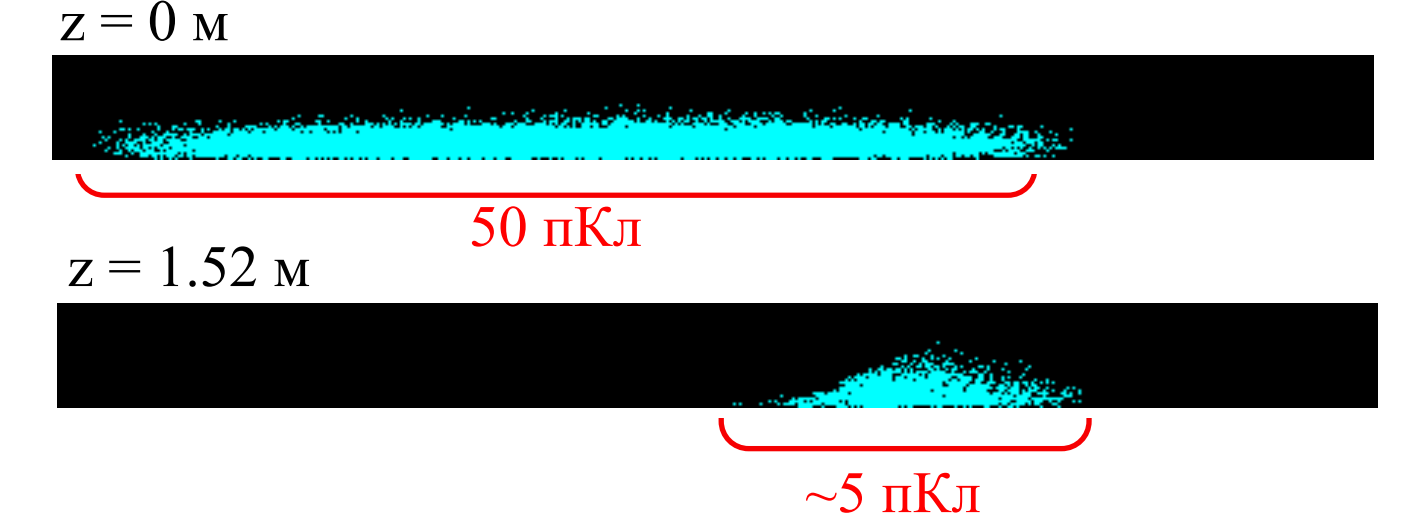
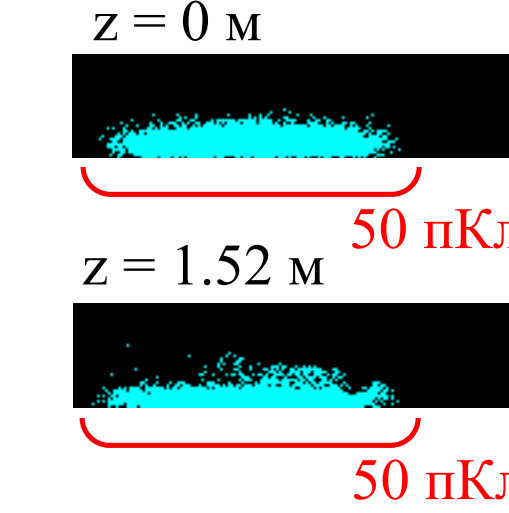


93 ГэВ, ~0.7%

107 ГэВ, ~0.6%

Заряд сохраняется

Часть заряда теряется



## Подробнее:

Эта работа: М.С.Дорожкина и др., Квантовая электроника 53, 176 (2023).

Квазистатическое приближение: П.В. Туев, Р.И. Спицын, К.В. Лотов, Физика плазмы 49, 154 (2023).

LCODE: <https://lcode.info/>

Р.И. Спицын, Численная реализация квазистатической модели лазерного драйвера для плазменного кильватерного ускорения. Магистерская диссертация, Новосибирский государственный университет, 2016.

K.V.Lotov, Fine wakefield structure in the blowout regime of plasma wakefield accelerators. Phys. Rev. ST Accel. Beams 6, 061301 (2003).

A.P.Sosedkin, K.V.Lotov, LCODE: A parallel quasistatic code for computationally heavy problems of plasma wakefield acceleration. Nuclear Instr. Methods A 829, 350 (2016).

## Как нас найти

