

# Эффективное ускорение электронов в режиме релятивистского самозахвата лазерного света

Брантов А. В., Быченков В. Ю., Лобок М. Г.

1. V. F. Kovalev and V. Yu. Bychenkov, Analytic theory of relativistic self-focusing for a Gaussian light beam entering a plasma: Renormalization-group approach. Phys. Rev. E. Vol. 99, P. 043201 (2019)
2. V. Yu. Bychenkov, M. Lobok, V. F Kovalev and A. V. Brantov, Generation of high-charge electron beam in a subcritical-density plasma through laser pulse self-trapping, Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 61, P.124004 (2019)
3. M. G. Lobok, A. V. Brantov, D. A. Gozhev and V. Yu. Bychenkov, Optimization of electron acceleration by short laser pulses from low-density targets, Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 60, P. 084010 (2018)
4. M. G. Lobok, A. V. Brantov and V. Yu. Bychenkov, Effective production of gammas, positrons, and photonuclear particles from optimized electron acceleration by short laser pulses in low-density targets. Phys. Plasmas. Vol. 26, P. 123107 (2019)

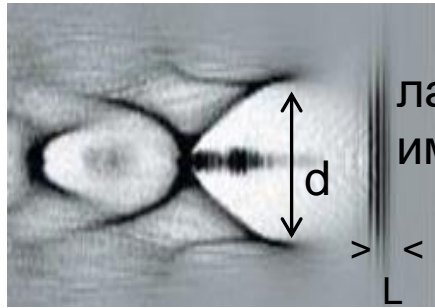
На премию им. Н. Г. Басова 2020 год

# Кильватерное ускорение электронов

Основные принципы кильватерного ускорения  
Tajima T. and Dawson J. M. 1979 Phys. Rev. Lett. **43** 267

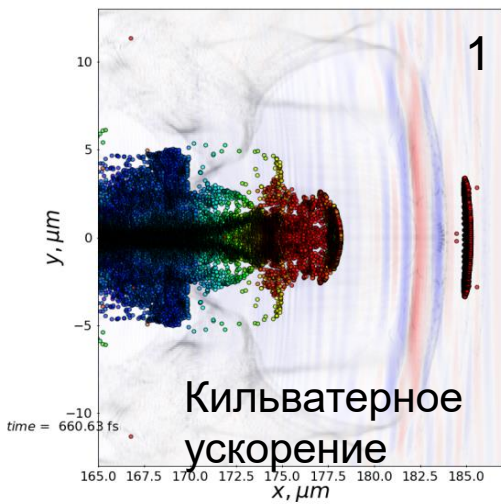
Нелинейный трехмерный режим  
Pukhov A. and Meyer-ter-Vehn J., 2002 Appl. Phys. B: Lasers  
Opt. **74** 355

$$L < \lambda_p \quad L < d$$



$0.004n_c$

В настоящее время получают квазимоноэнергетичные пучки электронов с энергией до 3 ГэВ (газ) и 7.8 ГэВ (капилляр) но зарядом до  $\sim 10$  пКл

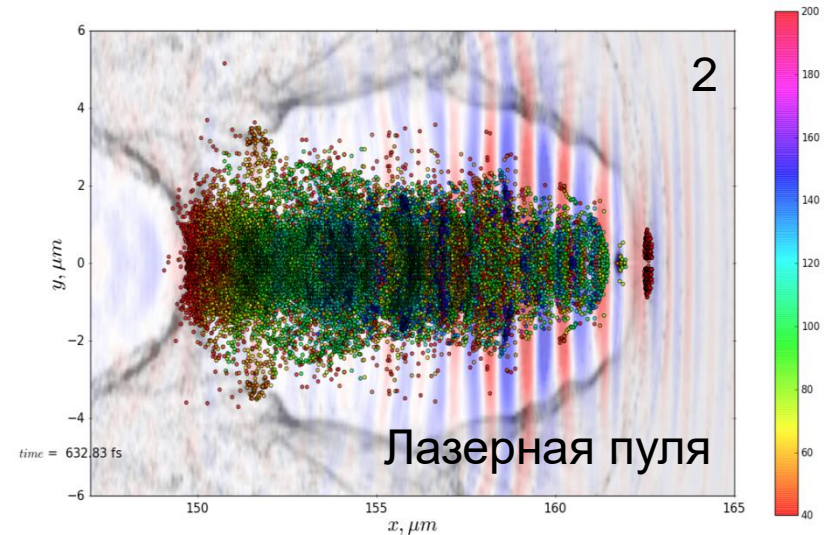


$$a_0 = 10, R = 10\lambda, \tau = 13\text{fs}, n_e = 0.04n_c$$

~~$L < \lambda_p \quad L < d$~~



$$L > \lambda_p, L > d$$

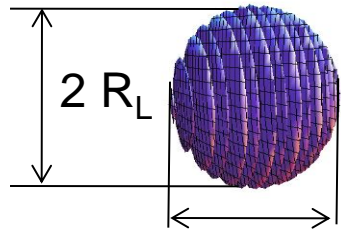


$$a_0 = 24, R = \frac{2\lambda}{2}, \tau = 30\text{fs}, n_e = 0.1n_c$$

$$E_1/E_2 \approx 2$$

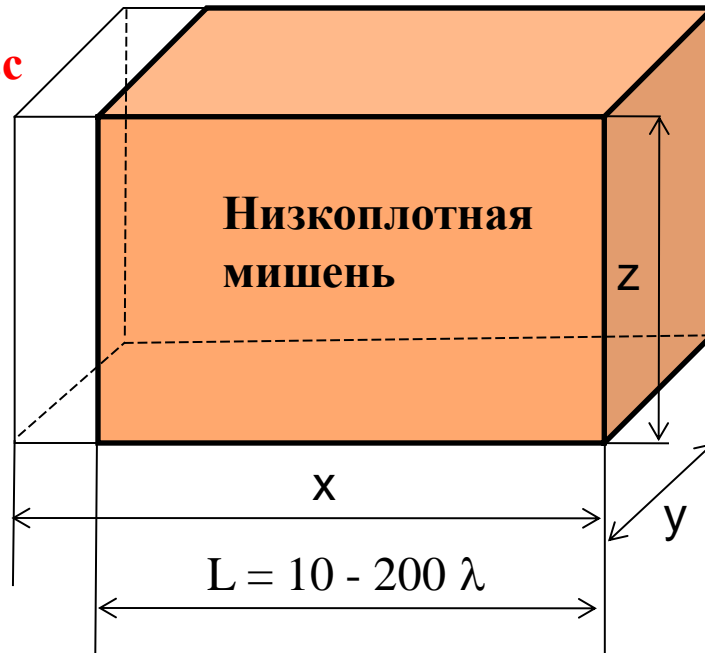
# Моделирование ускорения электронов для источника вторичного ЭМИ

**Лазерный импульс**

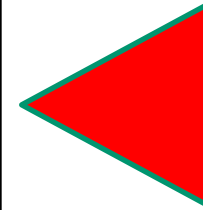


$\sim 4$  Дж,  $a_0 = 24$   
 $8 \times 10^{20}$  В/см<sup>2</sup>

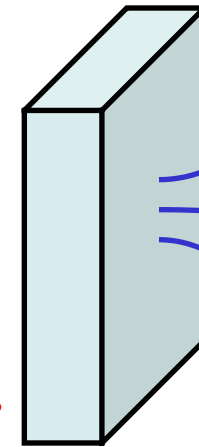
$\tau = 30$  фс  
 $2 R_L = 5$  мкм  
линейная  
поляризация



мишень { электроны  
неподвижные ионы



**Пучок электронов**



конвертер



Монте-Карло код  
**GEANT-4**



Все электроны за  
мишенью с энергией  
больше 30 МэВ

PIC код  
**Vsim (Vorpal)**

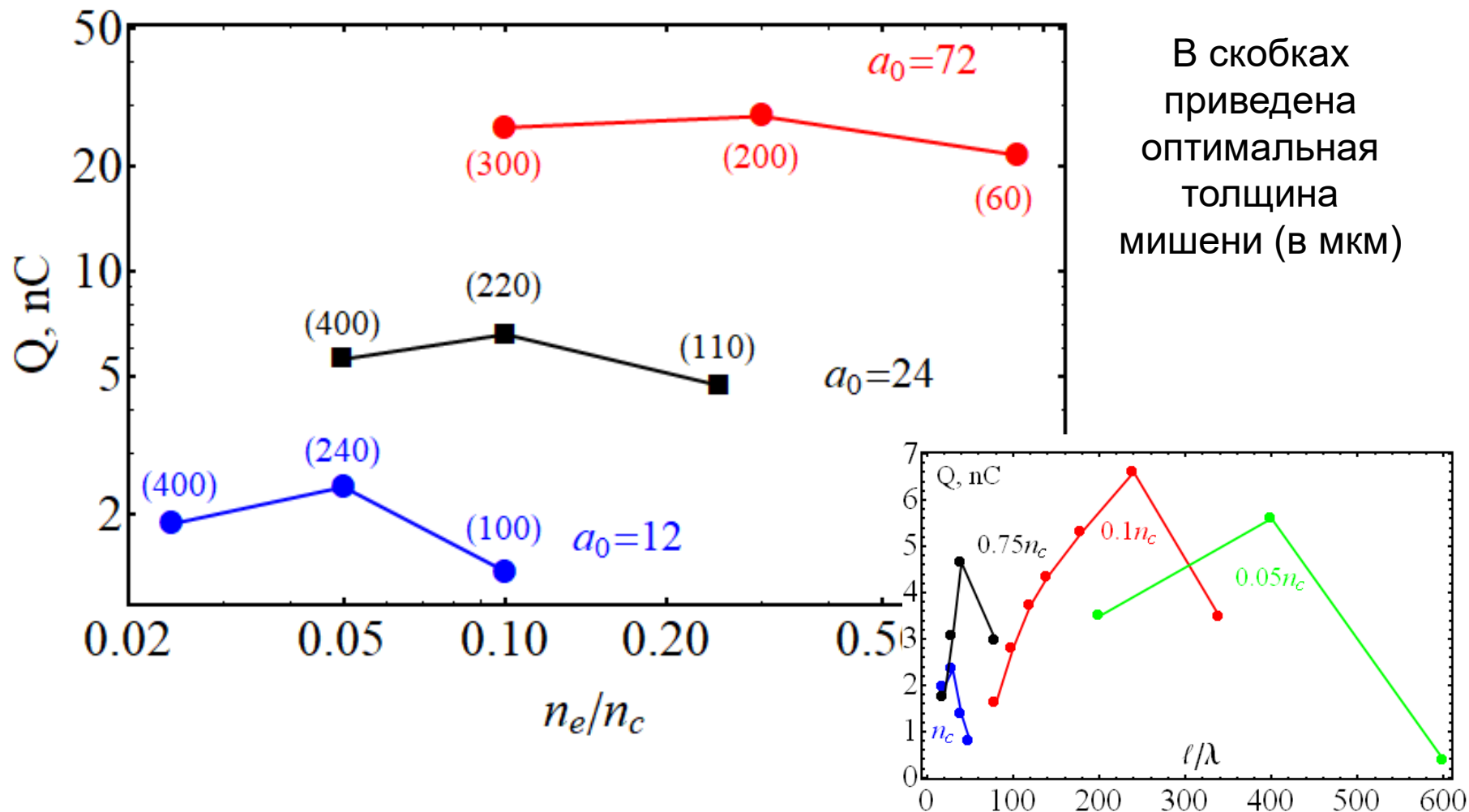


Режим движущегося окна  
 $x \times y \times z = 58 \lambda \times 25 \lambda \times 25 \lambda$

$\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = \lambda/50 \times \lambda/10 \times \lambda/10$

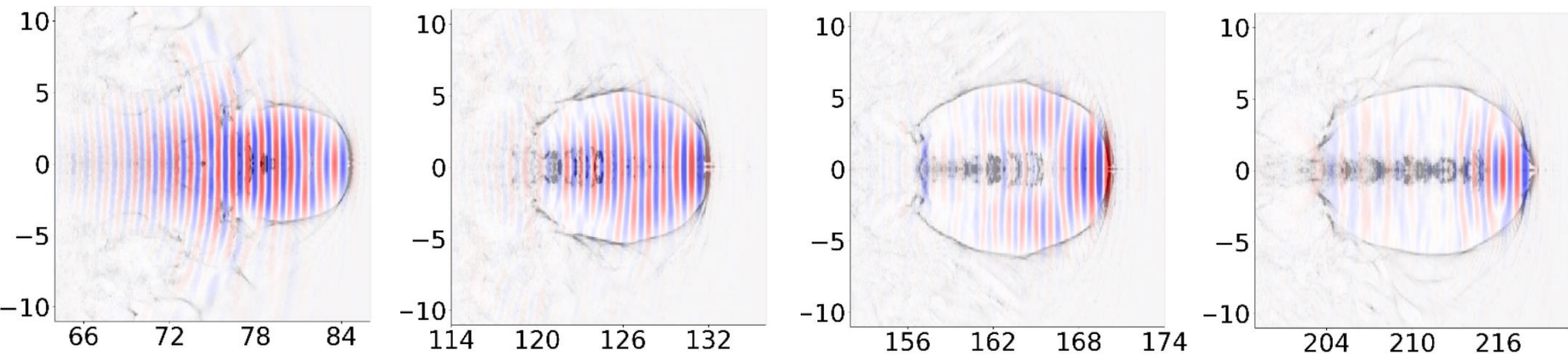
# Оптимизация ускорения электронов

Зависимость заряда ускоренных электронов ( $> 30$  МэВ) от параметров мишени



Существует оптимальная плотность мишени, которая зависит от интенсивности лазера и пятна фокусировки и приводит к максимальному заряду ускоренных ультрарелятивистских (с энергией  $> 30$  МэВ) электронов

# Распространение лазерного импульса



Распространение на  $\sim 10$  длин Рэлея

$$a_0 = 24$$

$$R_L = 2\lambda$$

$$R \simeq 5\lambda \simeq 2(c/\omega_p)\sqrt{a_0}$$

$$R \simeq \alpha \frac{c}{\omega_p} \sqrt{a_0}$$

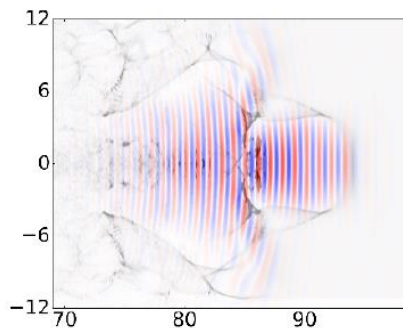
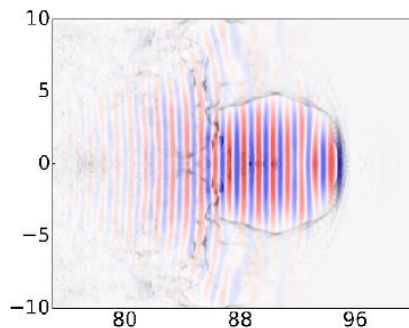
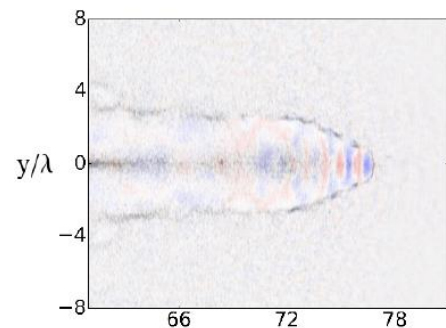
$\alpha$  - число  $\sim (1-2)$

Стабильное распространение только в условиях согласования!  
- ТОЛЬКО для одной плотности

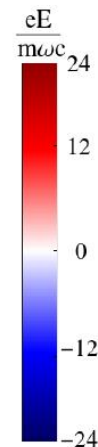
$$n_e = n_c$$

$$n_e = 0.1n_c$$

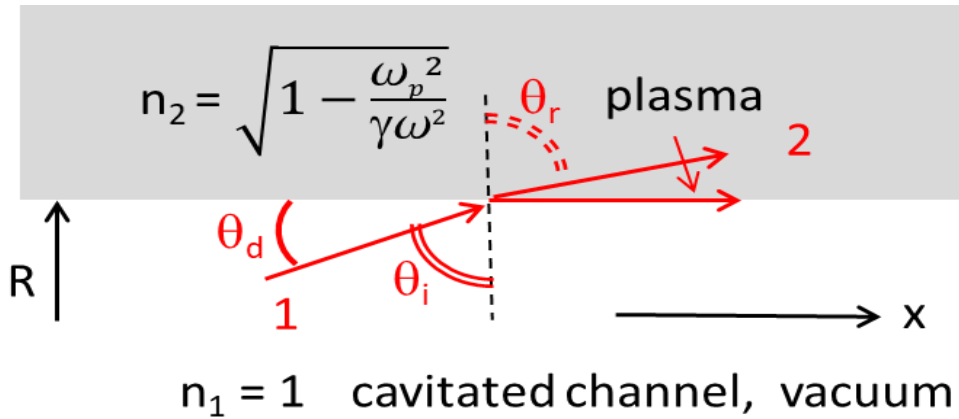
$$n_e = 0.05n_c$$



$x/\lambda$



# Физика условия релятивистского самозахвата



Дифракционная расходимость пучка  $\theta_d \simeq \lambda/\pi R$ .

Угол падения  $\theta_i = \pi/2 - \theta_d$

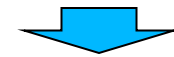
Условия прохождения  $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$ .

Условие полного отражения  $\theta_r = \pi/2$

$\sin \theta_i$   $\Downarrow$   $n_2$

$$\theta_d^2 \simeq \left( \frac{2c}{\omega R} \right)^2 \simeq \frac{\omega_p^2}{\gamma \omega^2} \simeq \frac{\sqrt{2} \omega_p^2}{a_0 \omega^2}$$

$$\gamma = \sqrt{1 + a_0^2/2} \simeq a_0/\sqrt{2}$$



$$R \simeq \frac{c}{\omega_p} 2^{3/4} \sqrt{a_0}$$

$$R \simeq \alpha \frac{c}{\omega_p} \sqrt{a_0} \quad \alpha = 2^{0.75}$$

$$R = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{n_c}{n_e}} \left( \frac{16\alpha^4 P}{P_c} \right)^{1/6} \quad P - \text{мощность лазера}$$

Дифракционная расходимость полностью компенсируется релятивистской нелинейностью!

# Режим самозахвата в нелинейно-оптической трактовке (теория)

$$2ik\partial_z E + \Delta_{\perp} E + k^2 \frac{\epsilon_{nl}}{\epsilon_0} E = 0$$

$$k = (\omega/c)\sqrt{\epsilon_0}$$

$$\epsilon_{nl} = \epsilon_0 \frac{k_p^2}{k^2} \left( 1 - \frac{n_e}{n_{e0}} \right)$$

нелинейность из-за изменения плотности

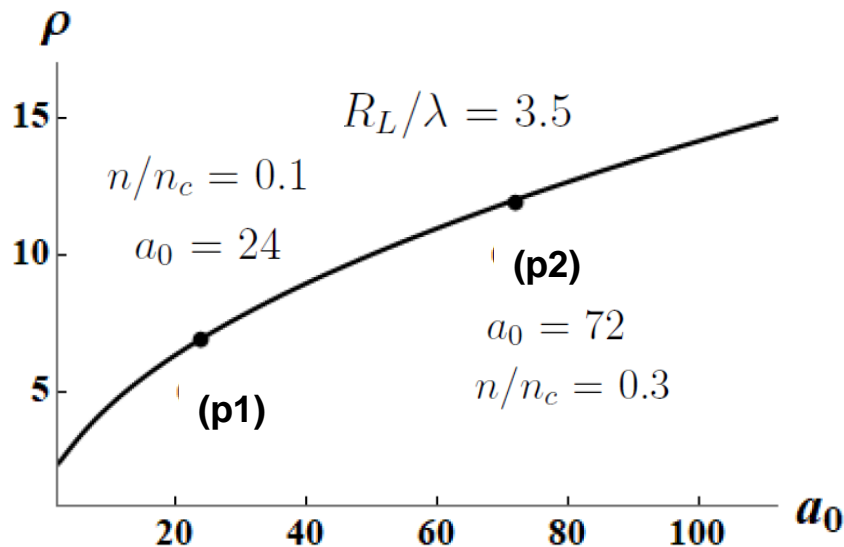
релятивистская нелинейность

Kovalev V F and Bychenkov V Yu 2019 *Phys. Rev. E* **99** 043201

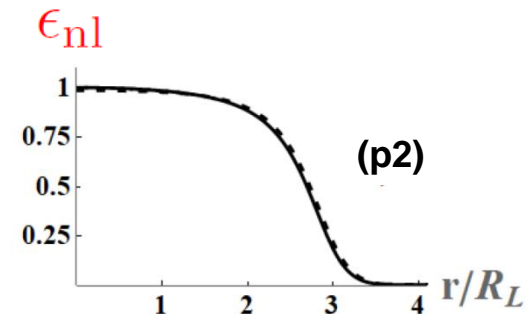
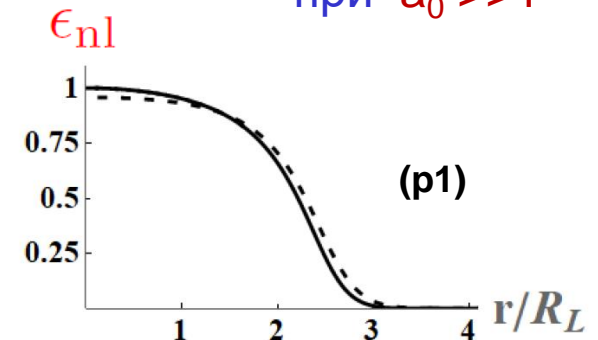
Условие самозахвата импульса

$$L(\rho, a_0) = 0 \quad \rho \equiv \omega_{pe} R_L / c$$

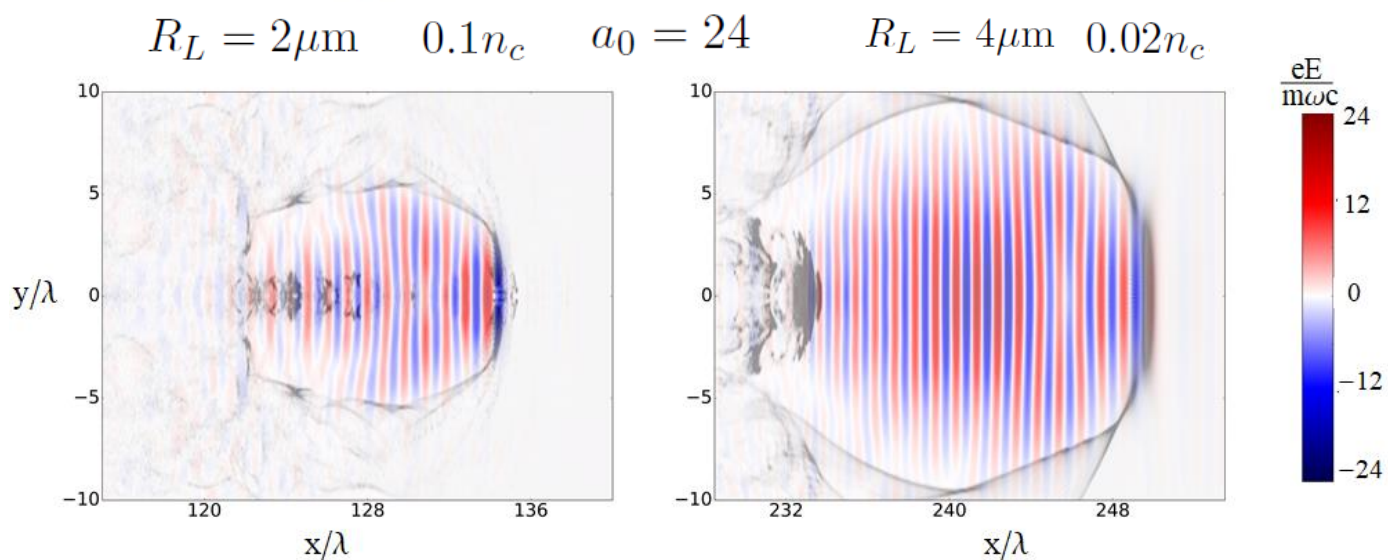
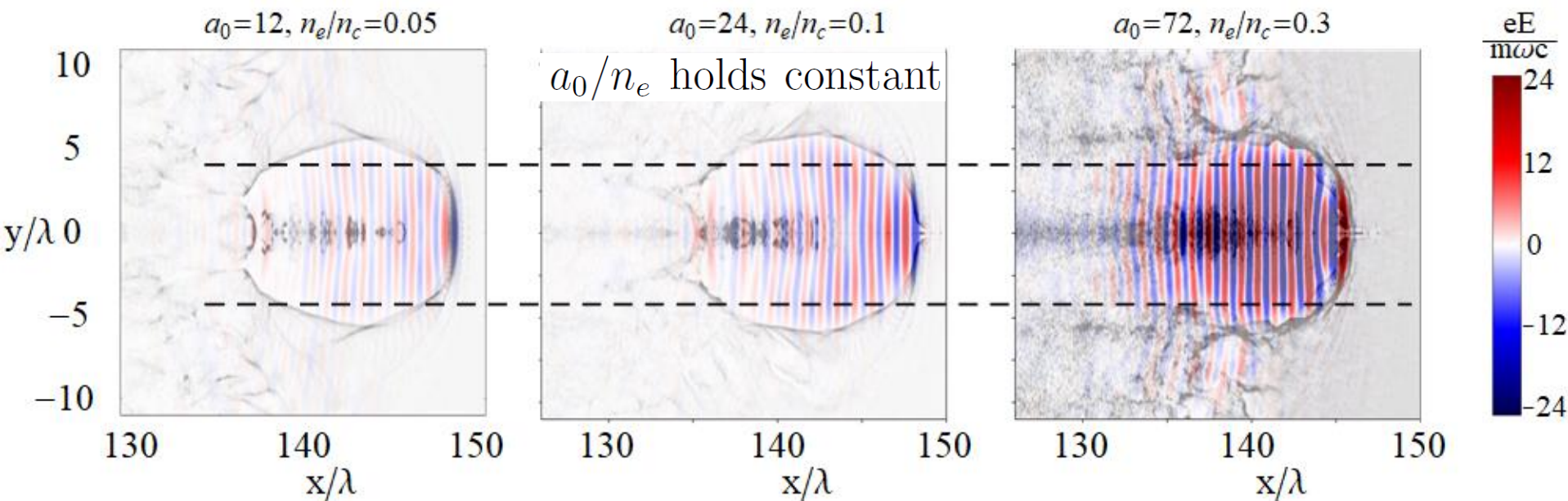
$$L(\rho, a_0) = (\rho^2 a_0^2 / 2) (1 + a_0^2)^{-3/2} - 1$$



Изменение плотности пренебрежимо для  $\epsilon_{nl}$  при  $a_0 \gg 1$

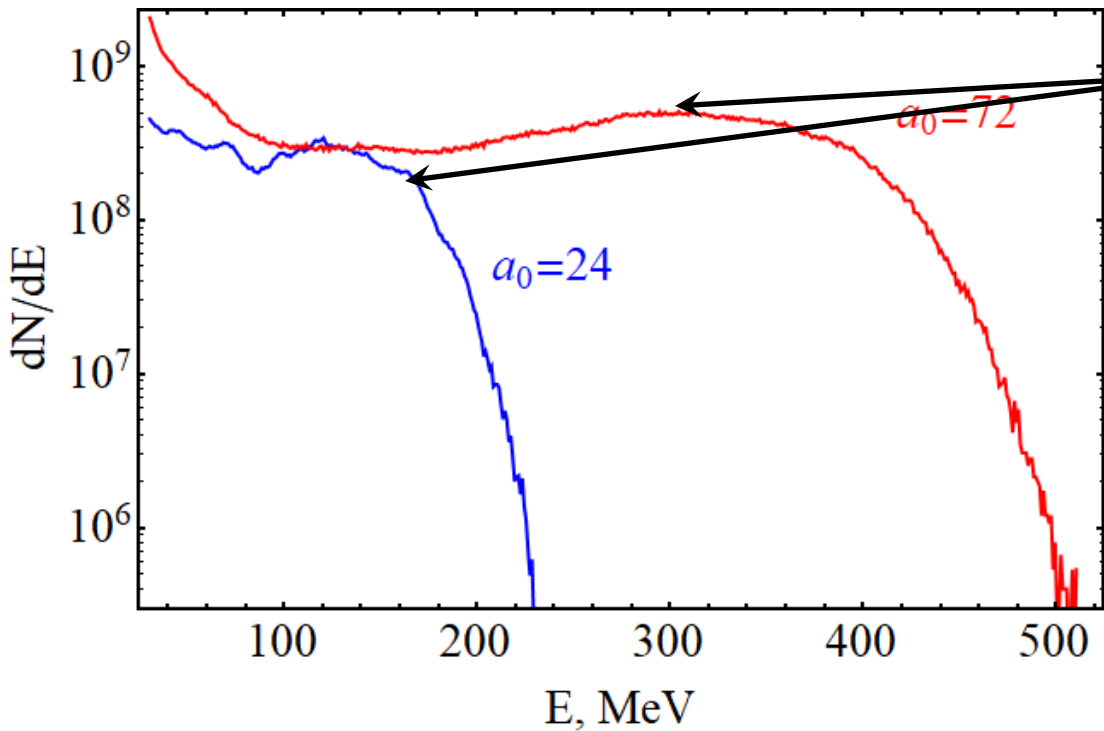


# Численная проверка условий согласования



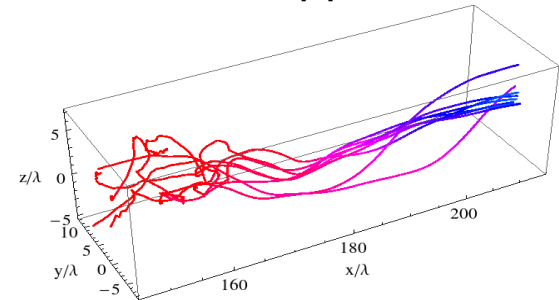


# Особенности ускорения электронов

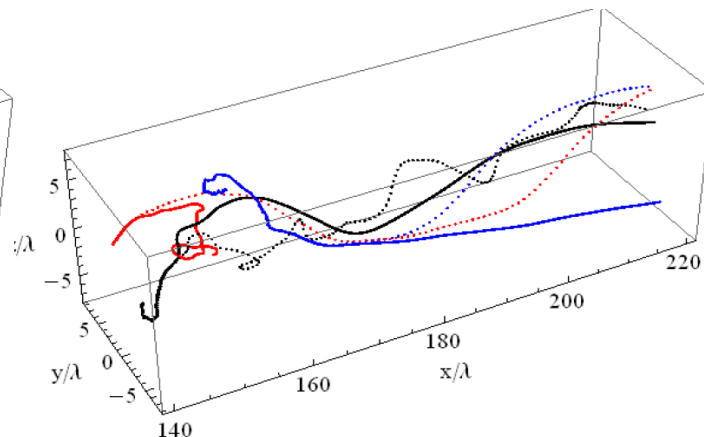
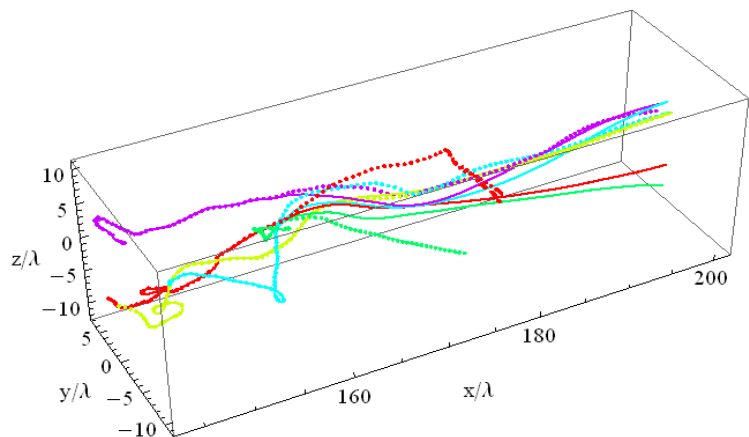


Выполненные спектры электронов

Анализ траекторий – стохастическая инжекция? – Да!

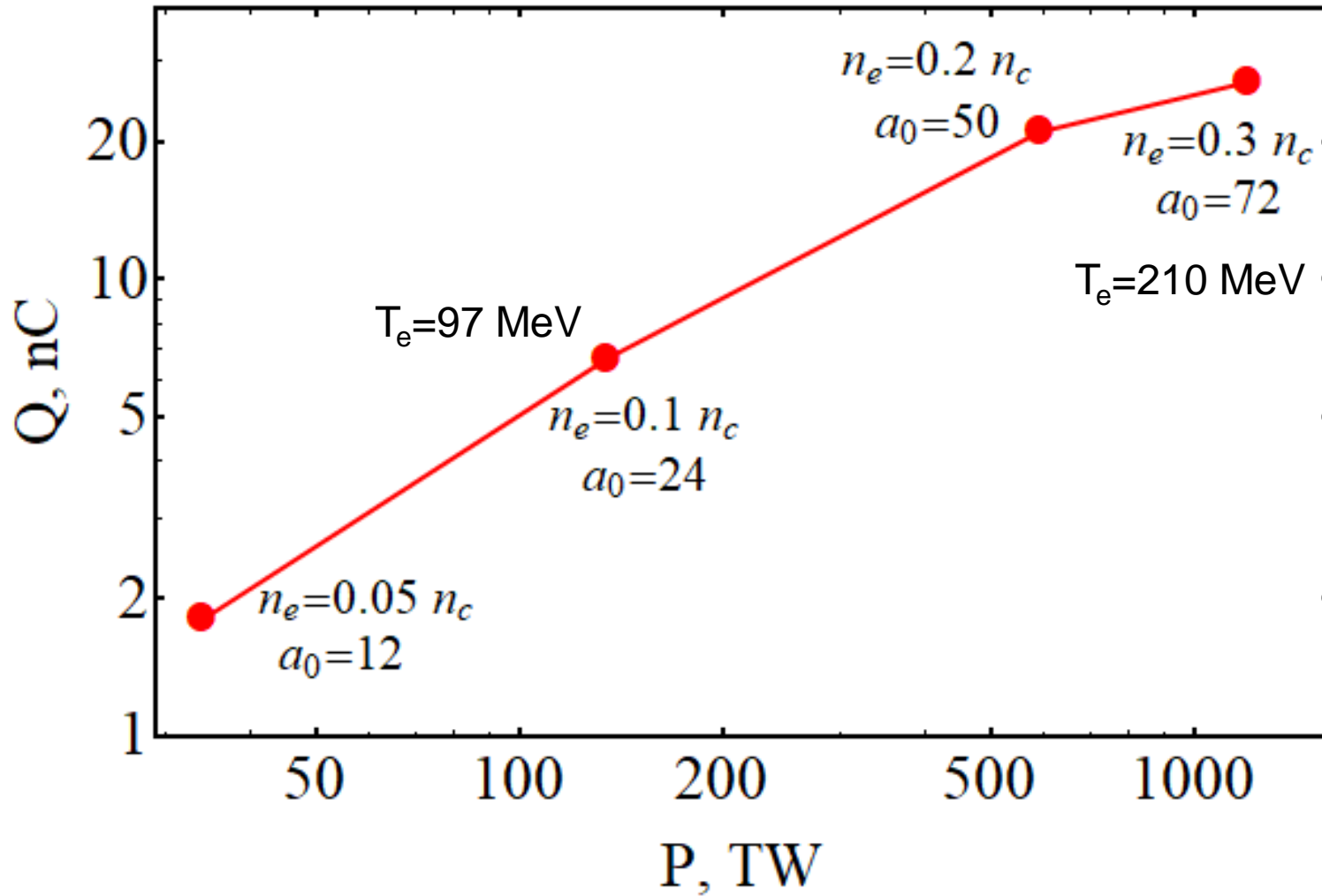


Остановили счет и внесли малые возмущения импульса – траектории разошлись (ср. пунктирные и сплошные кривые)



$$(|\delta p| / p = 10^{-4})$$

# Зависимость заряда пучка электронов от мощности лазерного импульса

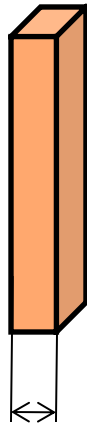


Эффективность конверсии энергии лазера в энергию электронов (с энергией > 30 МэВ) ~15 %

# Генерация гамма-излучения. Оптимальная толщина конвертера.

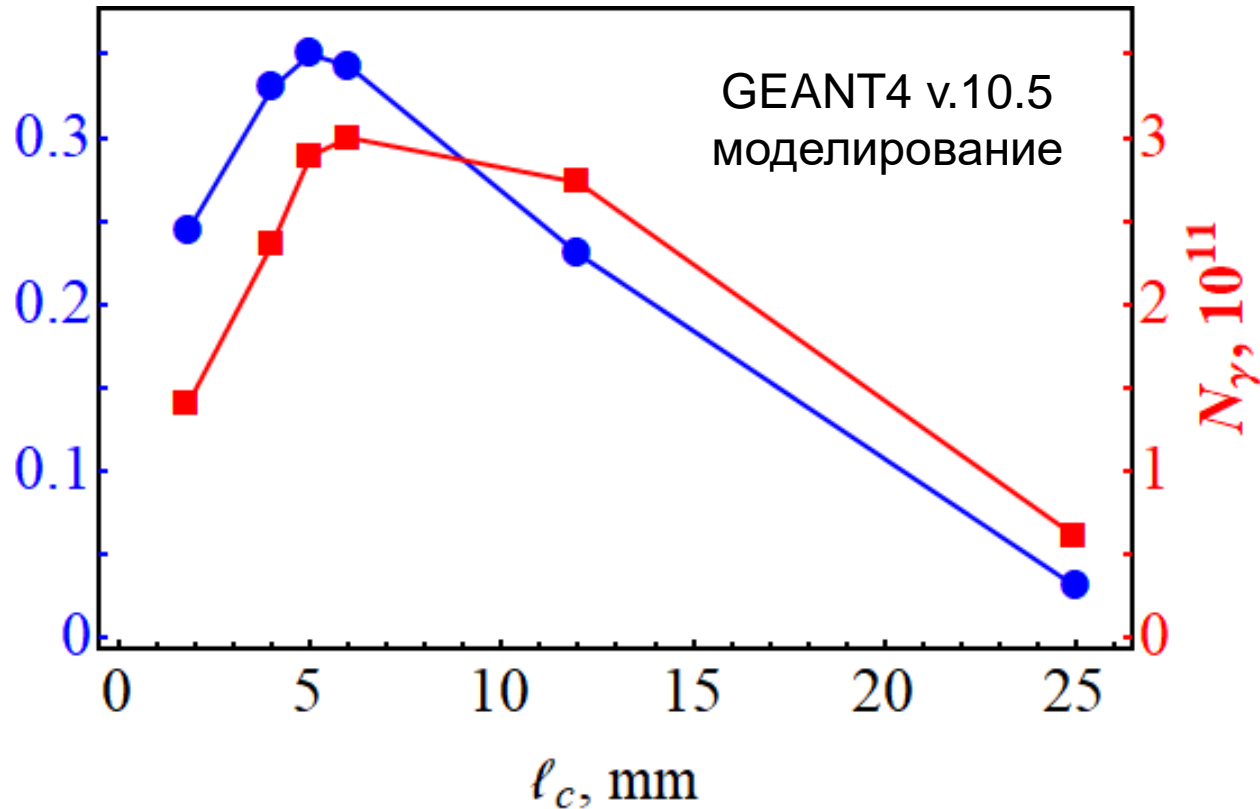
Пучок электронов  
7 нКл, 100 МэВ

Pt



$l_c$

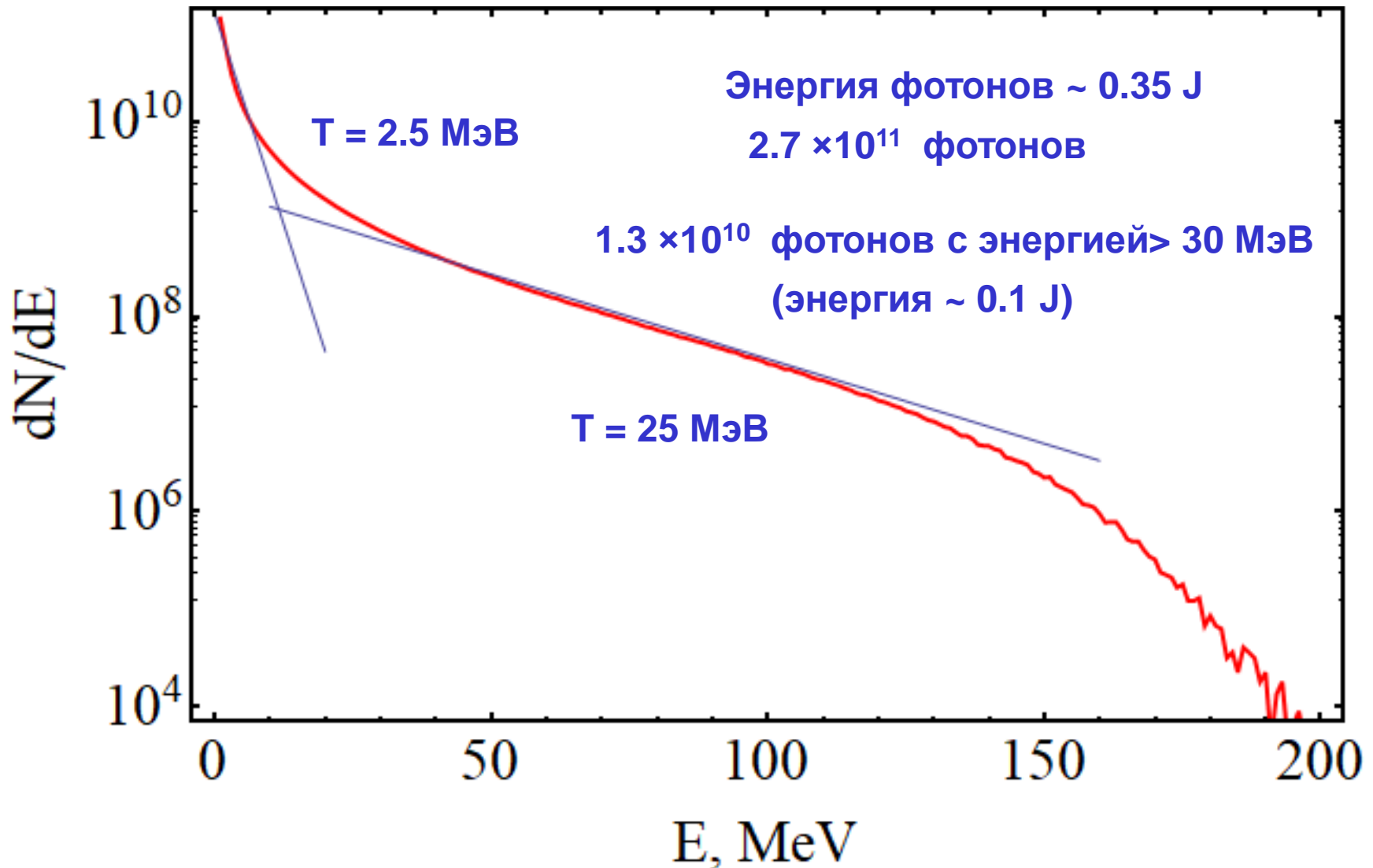
$E_\gamma, \text{J}$



Длина излучения 100  
МэВ-ного электрона в  
платине ~ 3 мм

Энергия фотонов ~ 0.35 Дж, что дает  
коэффициент конверсии лазер-гамма на  
уровне 9% !

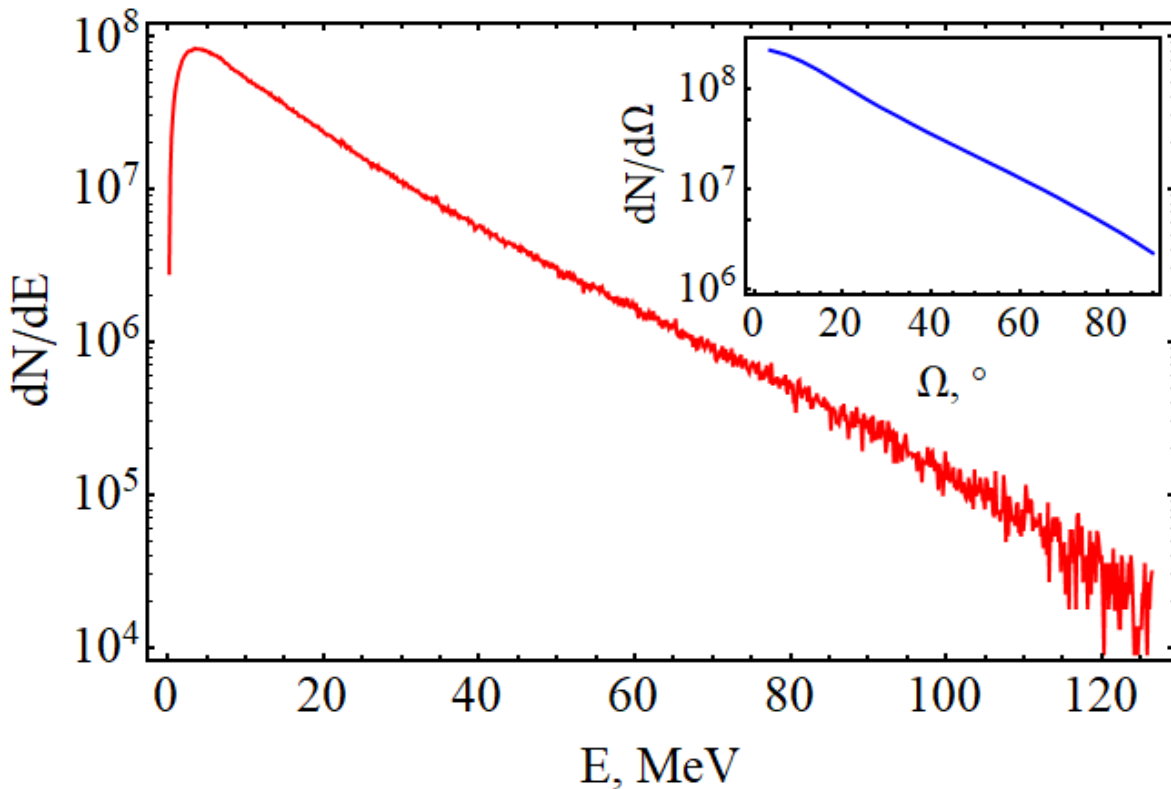
# Спектр гамма-излучения



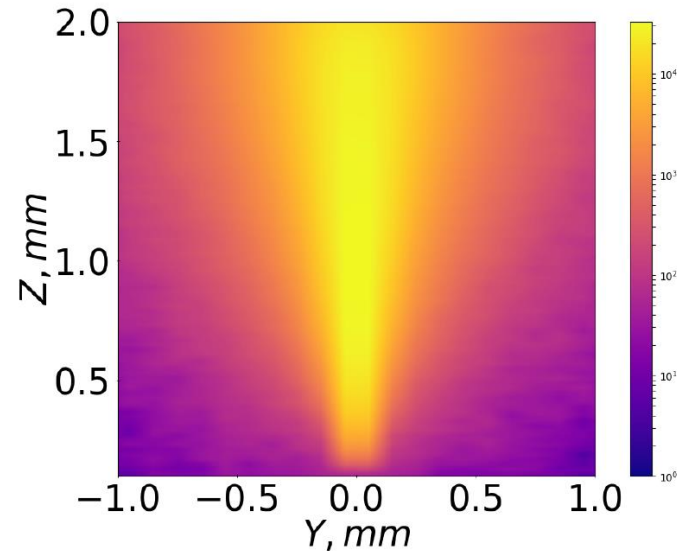
Конвертер - Pt с толщиной 5 мм

# Производство позитронов

Спектр позитронов генерируемых в Pt мишени (6 мм)



Позитронная струя из Pt мишени (1.8 мм)



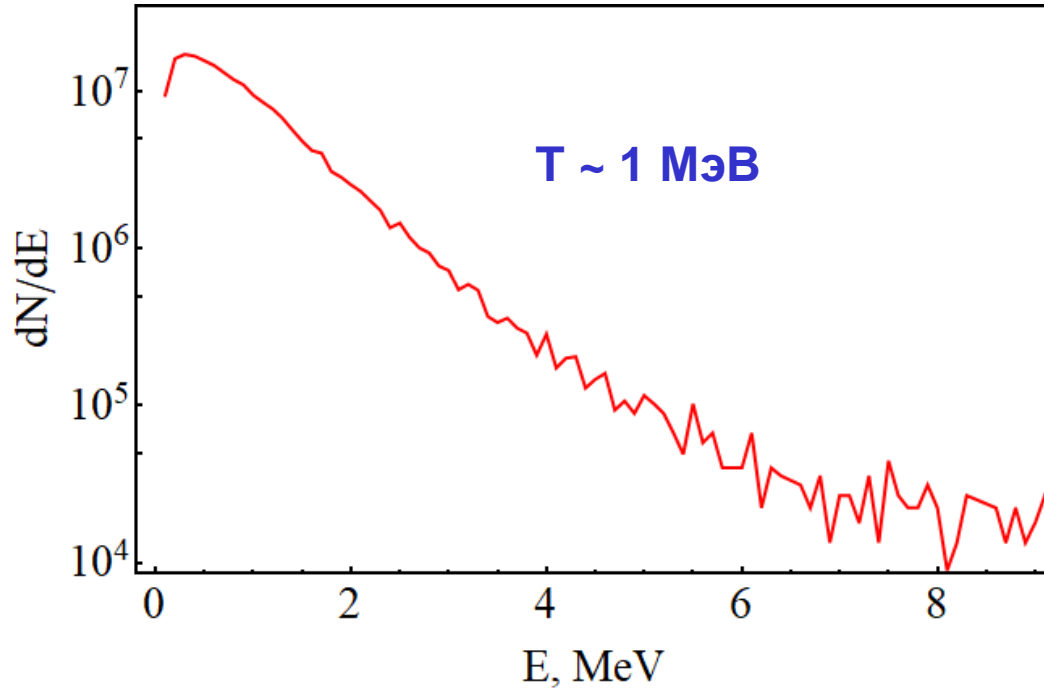
7 нКл, 100 МэВ пучок электронов



$1.3 \times 10^9$  позитронов

# Получение нейтронов

Спектр нейтронов после Pt конвертера (13 мм)



$\sim 10^7$  нейтронов



$\sim 2 \times 10^6$  нейтронов/Дж



4.3 Дж лазер



0.8 Дж пучок электронов

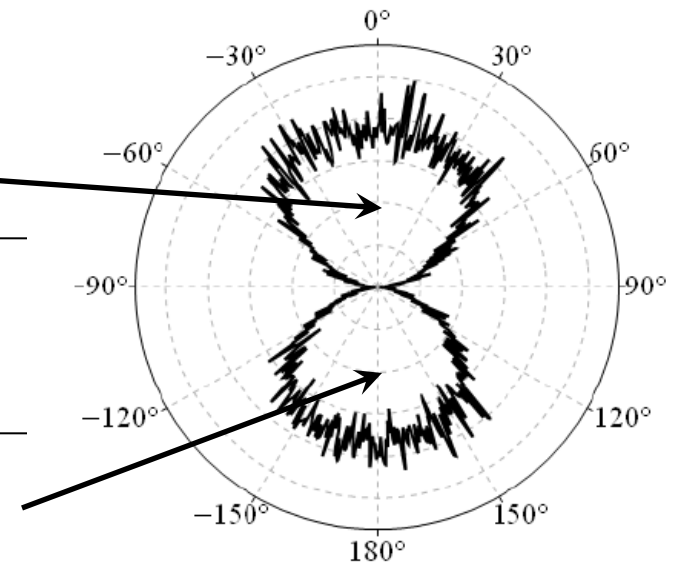


0.3 Дж гамма излучение



ядерные реакции

$(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, np)$ ,  $(\gamma, 3n)$



# Заключение

- Впервые удалось объяснить эмпирически подтверждаемое на протяжении нескольких лет условие согласования параметров лазера с плотностью плазмы, позволяющее достигать наилучшей эффективности лазерного ускорения электронов в прозрачной плазме.
- Доказано, что это условие отвечает режиму релятивистского самозахвата лазерного импульса, т.е. формированию нелинейной лазерно-плазменной структуры типа пространственного солитона – «лазерной пули», при котором импульс устойчиво распространяется в плазме и устойчиво ускоряет электроны, обеспечивая рекордный полный заряд.
- Показана перспективность использования лазерно-ускоренных электронов для генерации гамма-излучения, производства позитронов и нейтронов.