

**МГУ им.М.В.Ломоносова
Физический факультет и МЛЦ**



Генерация релятивистских частиц в пространственно неоднородной плазме под действием лазерных импульсов

Савельев Андрей Борисович

- К.А.Иванов, С.А.Шуляпов, Р.В.Волков
физический факультет и Международный лазерный
центр МГУ
- А.В.Брантов, В.Ю.Быченков
Физический институт РАН
- В.Г.Недорезов, А.М.Лапик, А.В.Русаков,
Р.М.Джилкибаев, А.А.Туринге
Институт ядерных исследований РАН

Outline

- Relativistic laser-plasma interaction: basics, problems and future outcomes
- Pre-plasma impact onto fast electron generation at high intensities

Relativistic optical field

Quiver electron velocity (classical):

$$m_e \ddot{x} = qE e^{i\omega t}$$

$$v_{osc} = \frac{qE}{m_e \omega} \approx c$$

Relativistic “threshold”

$$\mathcal{E}_{osc} \approx 0.5 \text{ MeV}$$

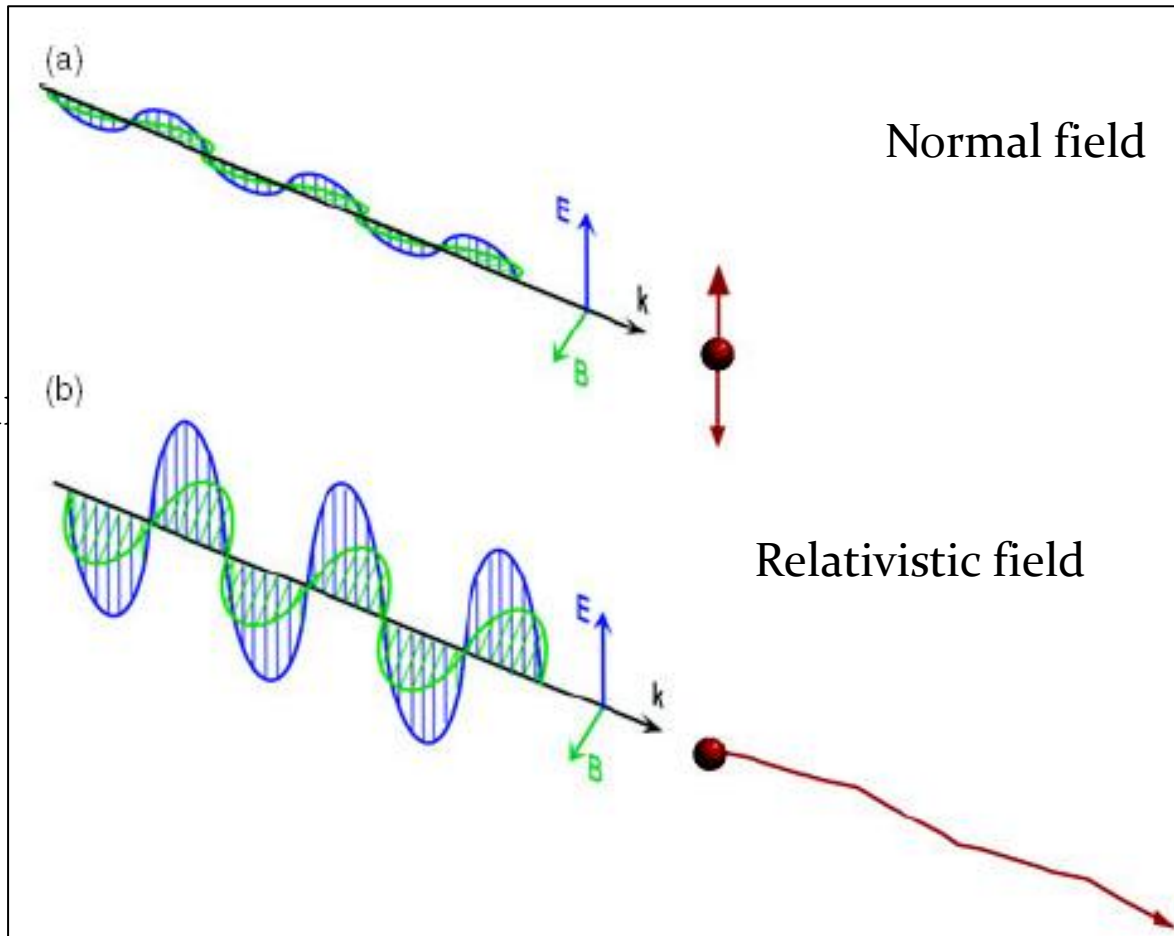
$$\mathcal{E}_{osc} = \frac{q^2 E^2}{2m_e \omega^2} = \frac{q^2 I \lambda^2}{\pi m_e c^3}$$

$$Q = I \lambda^2$$

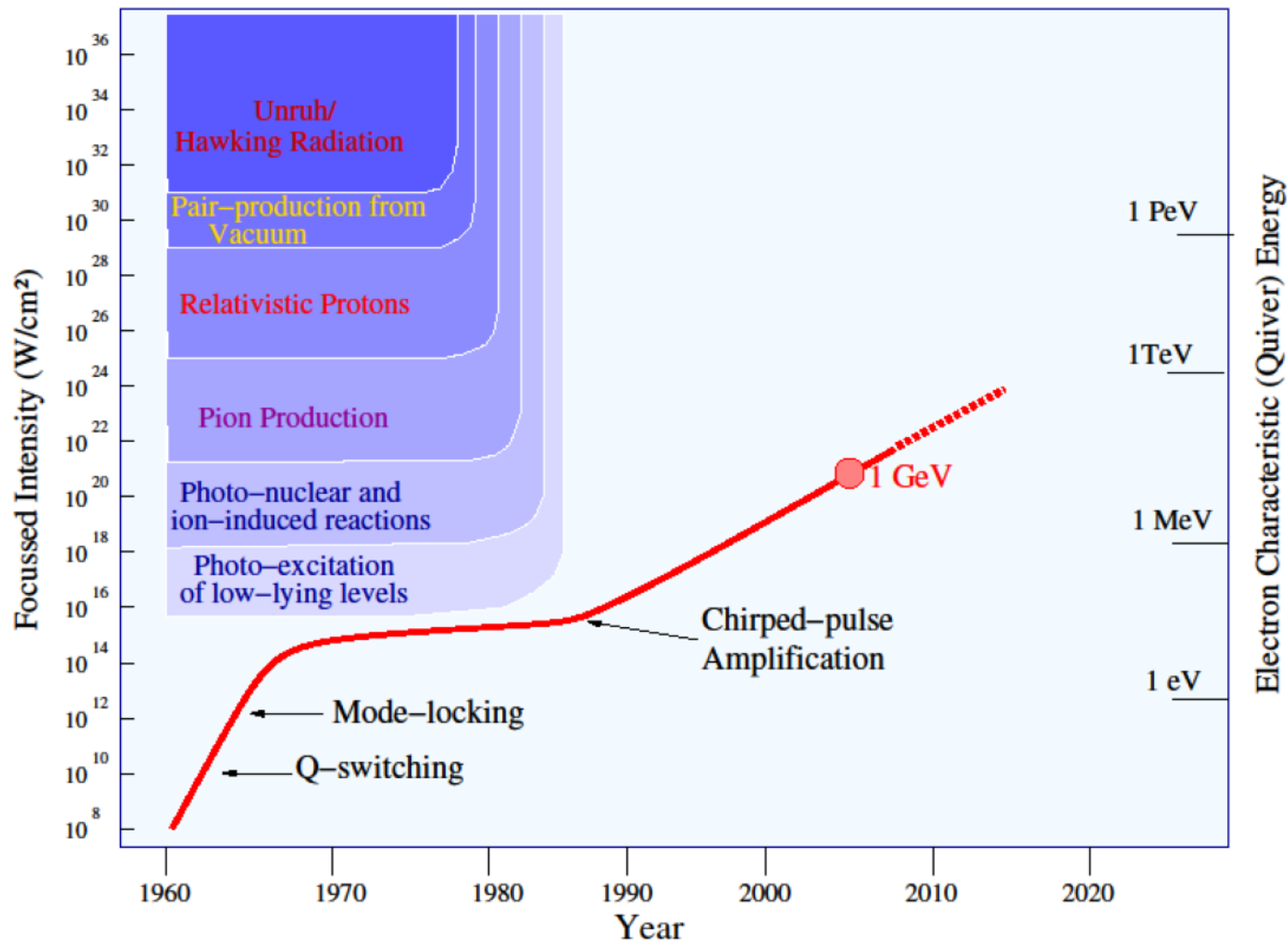
$$Q_R \approx 1,4 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2 \mu\text{m}^2$$

Electron motion

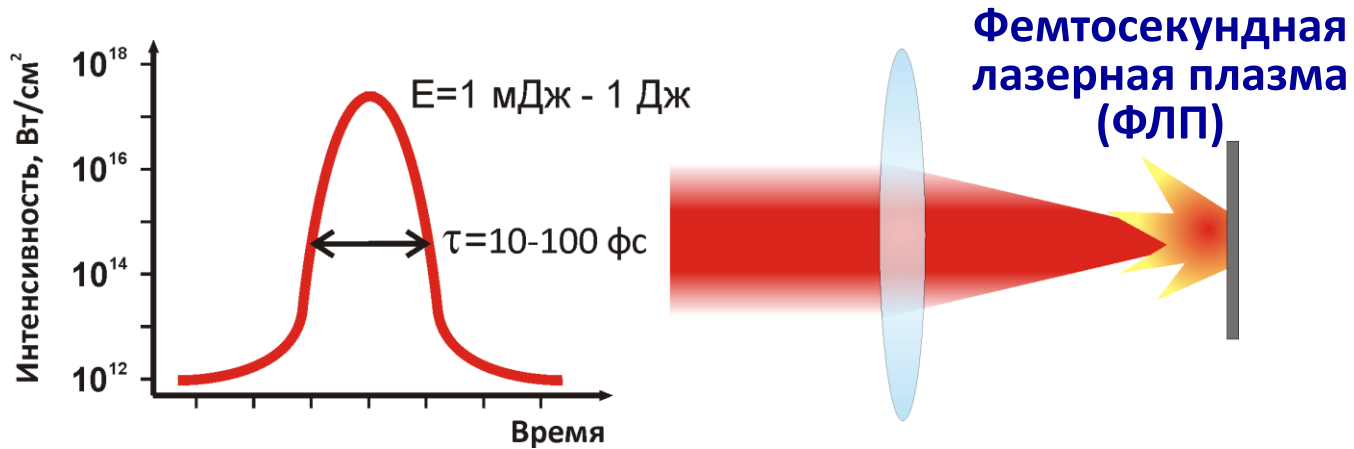
Non-linear



Пороговые значения интенсивности



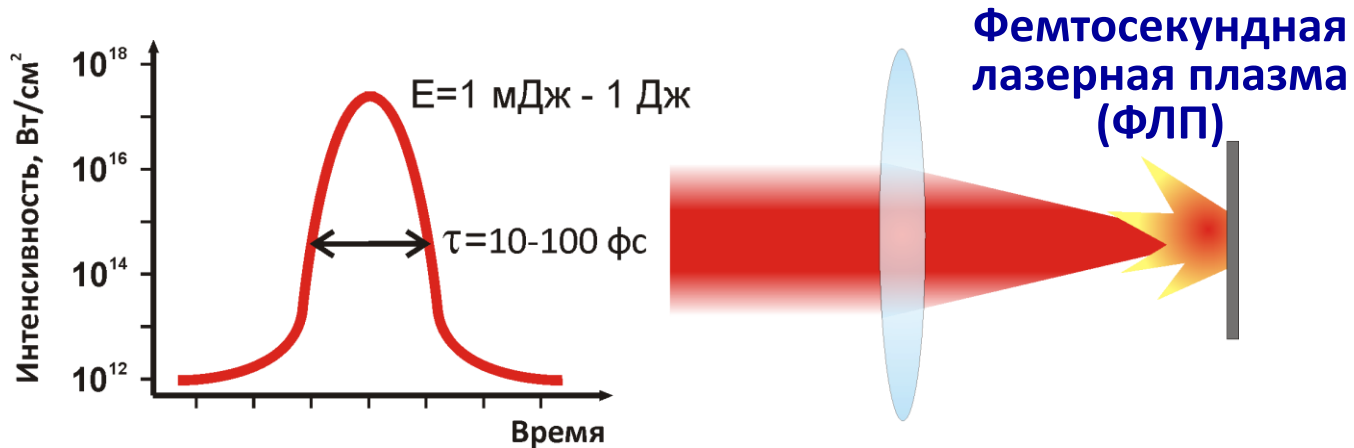
Образование плазмы и формирование быстрого электронного компонента



Свойства ФЛП:

- Малое время жизни: 1 пс – 10 нс
- Высокая скорость разлёта: $10^3 - 10^6$ м/с
- Малый размер: 1 мкм – 1 мм
- Не Максвелловское распределение электронов по скоростям

Образование плазмы и формирование быстрого электронного компонента



Свойства ФЛП:

- Малое время жизни: 1 пс – 10 нс
- Высокая скорость разлёта: $10^3 - 10^6 \text{ м/с}$
- Малый размер: 1 мкм – 1 мм
- Не Максвелловское распределение электронов по скоростям

Тепловой электронный компонент
(столкновение с ионами плазмы)

$$E_e \leq 1 \text{ кэВ}$$

Быстрые (горячие) электроны
(ускорение лазерным полем)

$$E_h = 1 \text{ кэВ} - 1 \text{ ГэВ}$$

Процессы в плазме

Интенсивности излучения:

$$I \sim 10^{15} - 10^{17} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

Умеренные

$$I \sim 10^{17} - 10^{18} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

Субрелятивистские

$$I > 10^{18} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

Релятивистские



Горячие электроны

- Аномальный скин-эффект ($L_a/\lambda \ll 1$)
- Вакуумный нагрев ($L_a/\lambda < 0.1$)
- Резонансное поглощение ($L_a/\lambda \geq 0.1$)

Быстрые ионы

- Ускорение амбиполярным полем

Рентгеновское излучение

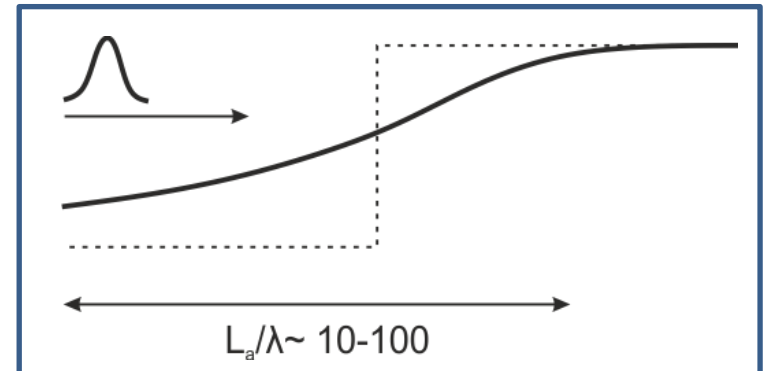
- Тормозное излучение
- Рекомбинационное излучение
- Характеристическое излучение

$$T_h \sim 10 \text{ кэВ}$$

$$I < 10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

Обратно-тормозное поглощение
-> тепловая компонента

$$L_a = n_e \left(\frac{\partial n_e}{\partial x} \right)^{-1} = \left(\frac{\partial \ln n_e}{\partial x} \right)^{-1}$$



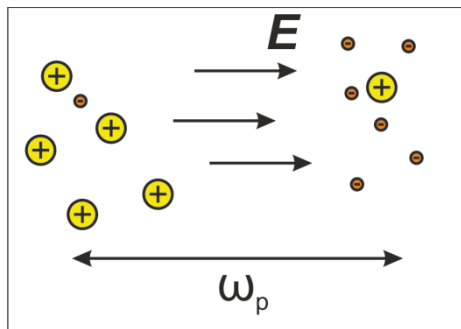
Механизмы генерации “горячих” электронов. Область релятивистских интенсивностей.

$$N_{cr} = \frac{m_e \omega_0^2}{4 \pi e^2}$$

$$Q = \frac{I}{I_{\text{рел}}}$$

$$\bar{F}_\perp = -|e|\bar{E} - \frac{|e|}{c} [\bar{v} \times \bar{B}]$$

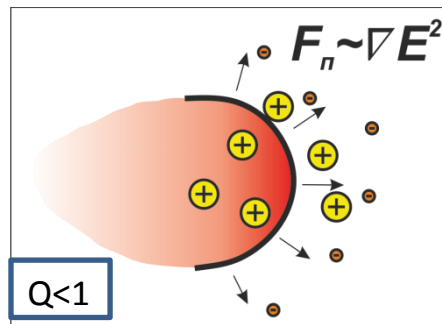
Резонансное
поглощение



$$\frac{L_a}{\lambda} \geq 0.1$$

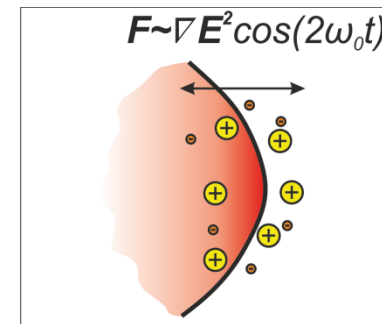
$$N_e > N_{cr}$$

Пондеромоторное
ускорение



$Q < 1$

$[\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$
нагрев

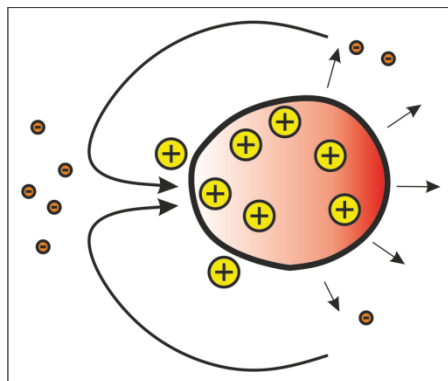


$Q > 1$

$$\frac{L_a}{\lambda} < 1$$

$$N_e > N_{cr}$$

Ускорение в
кильватерной волне



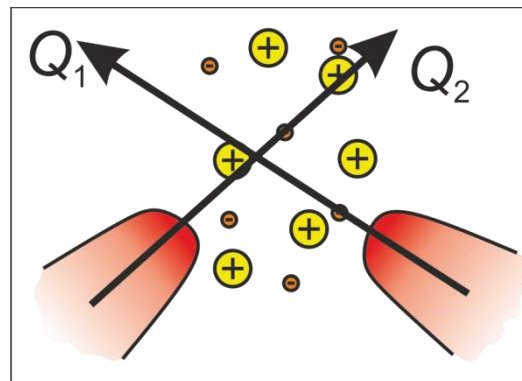
$$\frac{L_a}{\lambda} \gg 1$$

$$N_e < N_{cr}$$

$$Q > 1$$

$$\omega_p \tau_{и} \approx \pi$$

Стохастический
нагрев



$$\frac{L_a}{\lambda} \gg 1$$

$$N_e < N_{cr}$$

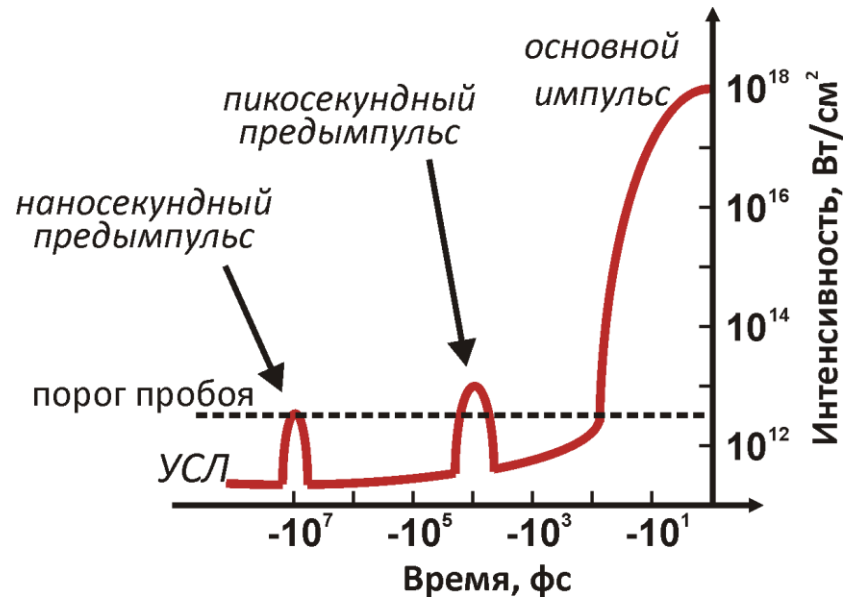
$$Q_{1,2} > 1$$

Длинный
импульс

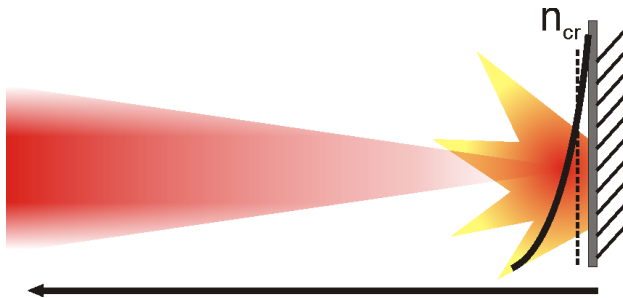
Гамма-излучение:
Тормозное излучение

Быстрые ионы:
Ускорение
Амбиполярным полем

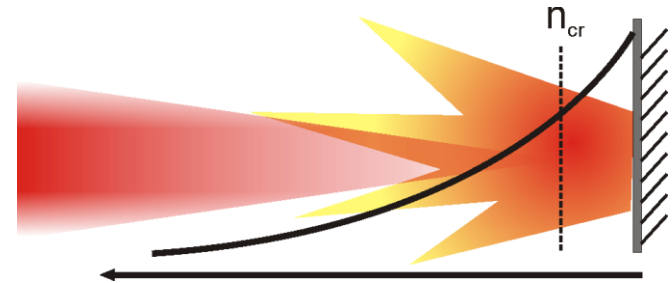
Влияние контраста лазерного излучения на генерацию быстрых электронов в плазме



«Высокий» контраст



«Низкий» контраст





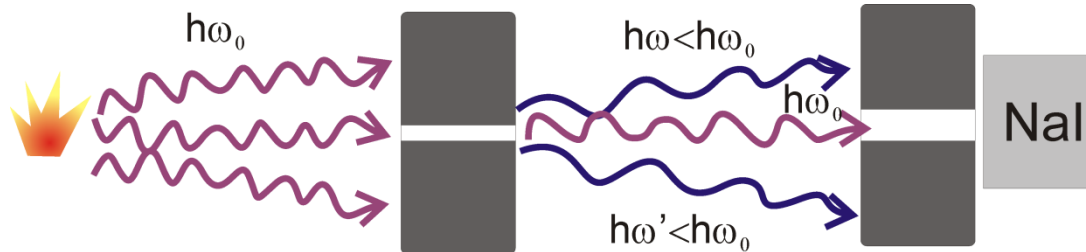
Ti:Sapphire Laser

МЛЦ МГУ

- Energy per pulse **1-50 mJ**
- Energy stability **3%** rms within 1 hour
- Pulse duration **>35 fs**
- Central wavelength **805 nm**
- Spectral bandwidth **23 nm**
- Repetition rate **10 Hz**
- $M^2 = \mathbf{1.7}$
- Nanosecond contrast **4×10^7**
- Picosecond contrast better than **10^6**

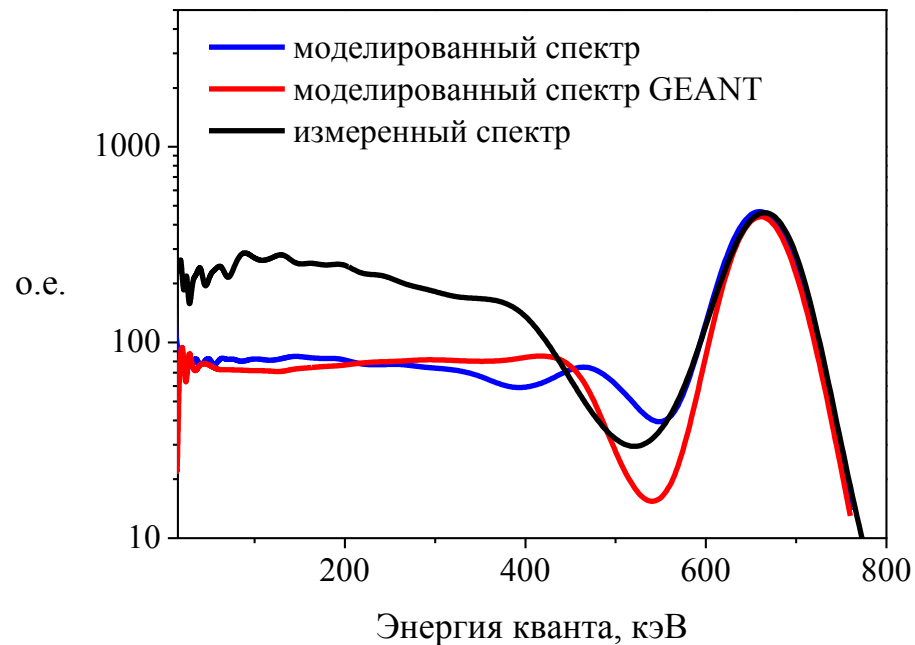
Методика измерения спектра и оценки параметров плазмы

1. Коллимация потока рентгеновских квантов



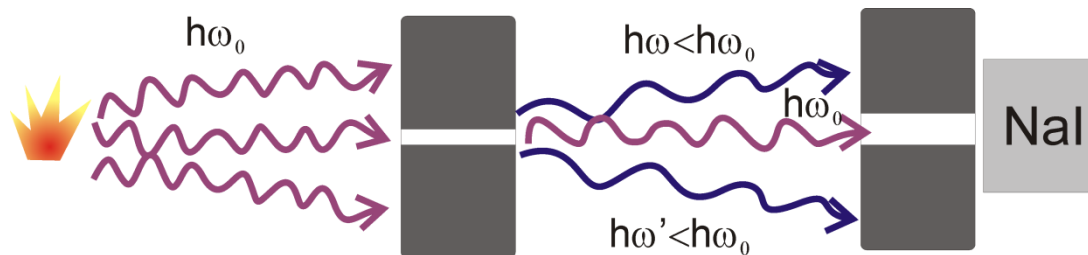
2. Моделирование поглощения квантов в веществе сцинтиллятора

**Спектр источника
Cs-137 (линия 662 кэВ)**

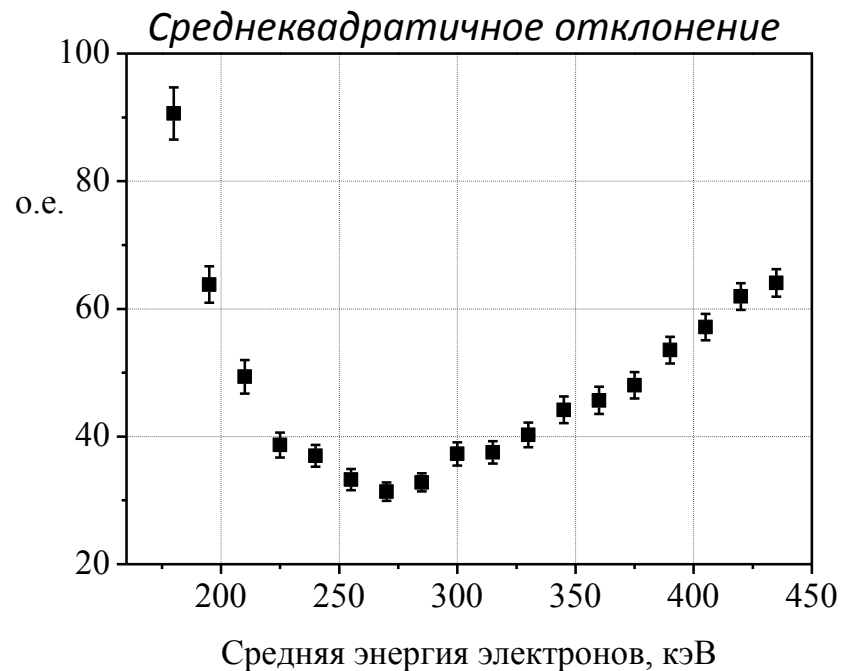
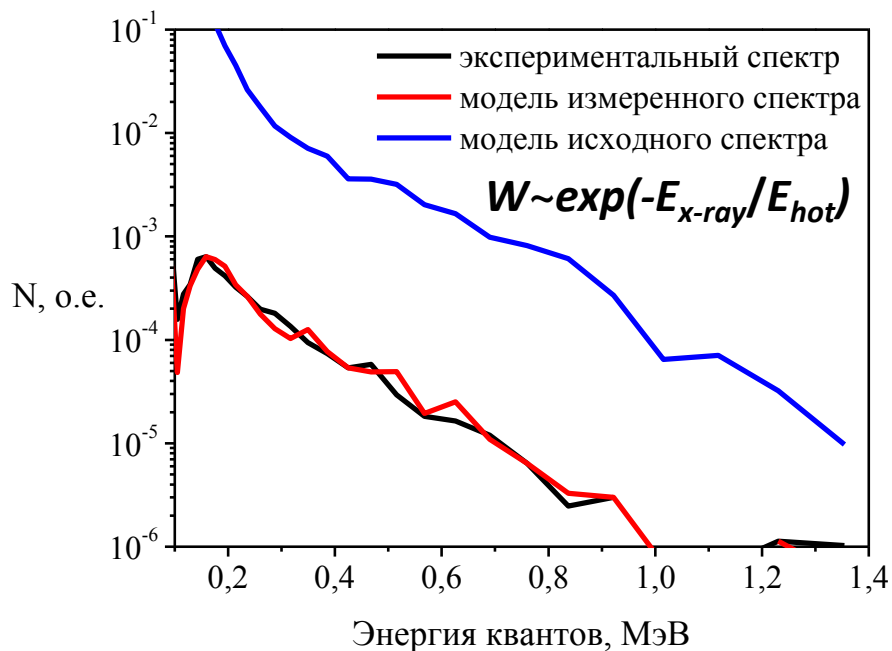


Методика измерения спектра и оценки параметров плазмы

1. Коллимация потока рентгеновских квантов



2. Моделирование поглощения квантов в веществе сцинтиллятора



PIC & GEANT

- пятно размером 4 мкм
- плотность которой составляла 4 критических
- облако неплотной плазмы с экспоненциально спадающим градиентом плотности от поверхности мишени к вакууму длиной 4 мкм
- длительность импульса составляла 50 фс, а пиковая интенсивность – 2×10^{18} Вт/см².

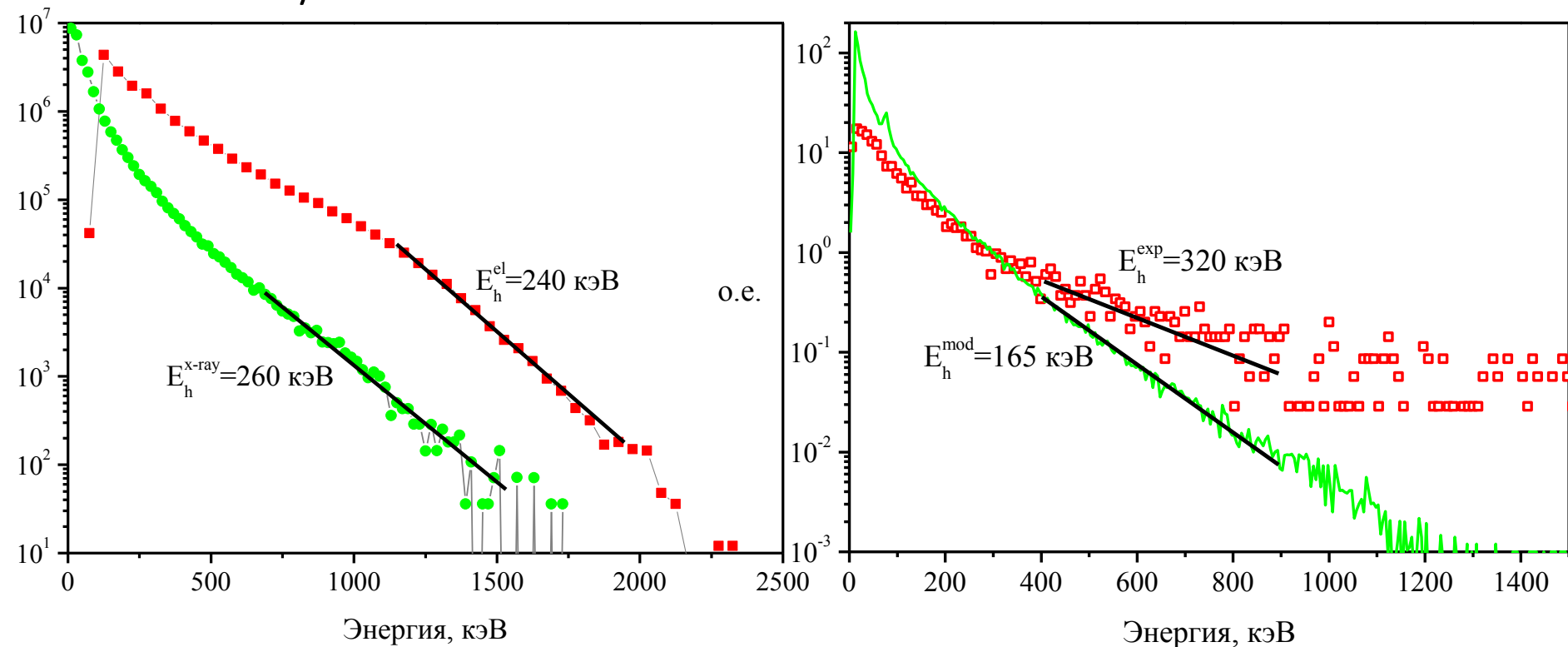


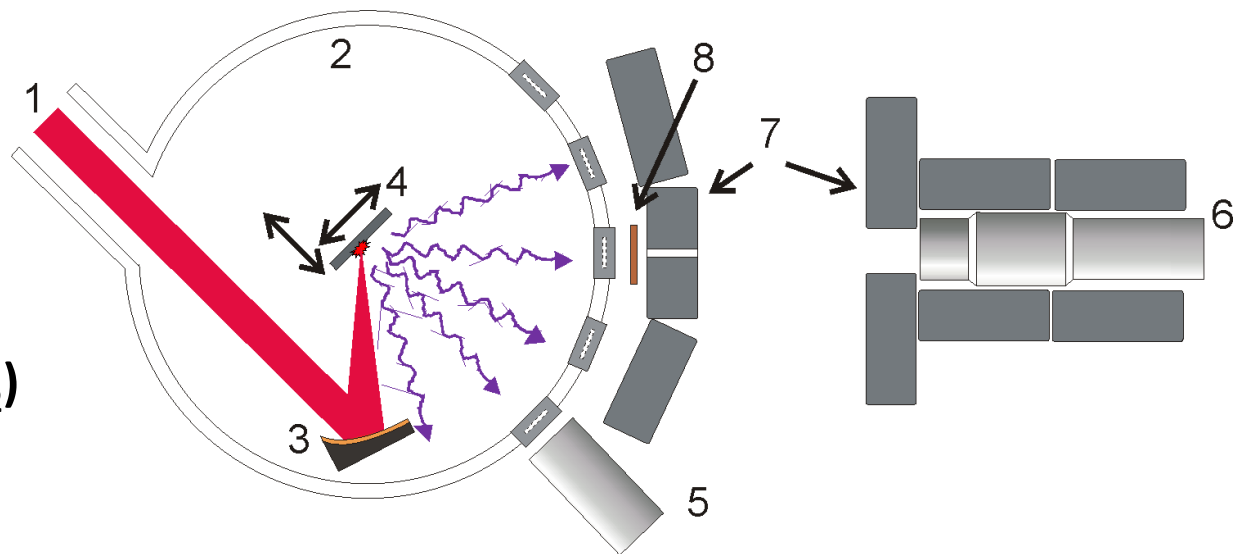
Схема экспериментальной установки

Параметры лазерного импульса (Ti:Sapphire):

$\tau = 45 \pm 5 \text{ фс}, 350 \pm 50 \text{ фс}; \lambda = 800 \text{ нм}; \nu = 10 \text{ Гц}; E = 1-10 \text{ мДж};$

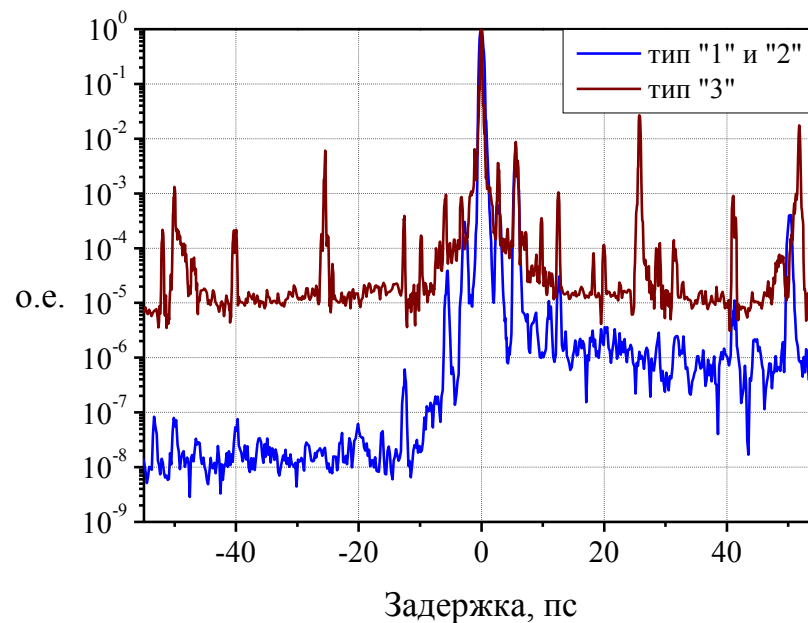
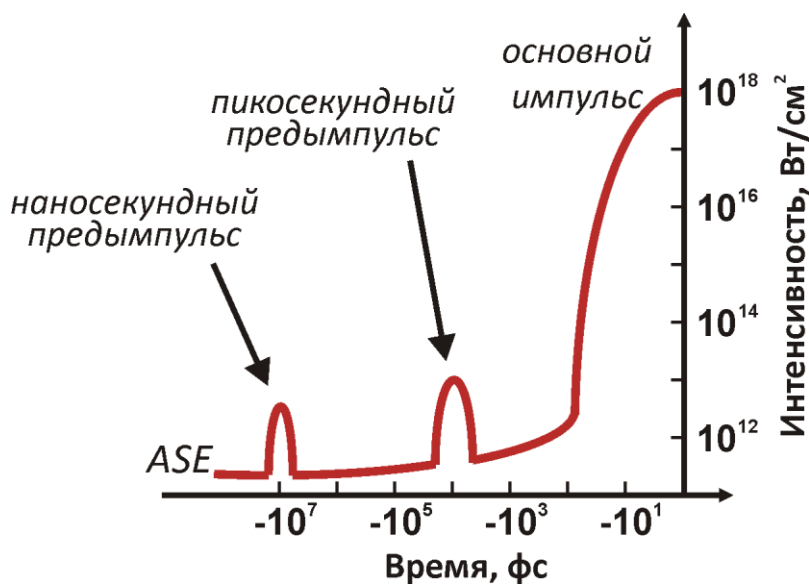
$I_{\text{max}} = 10^{17} - 2 \times 10^{18} \text{ Вт/см}^2$

Мишень:
Железо (Fe)
Свинец (Pb)
Плавленый кварц (SiO_2)



1- лазерное излучение, 2 – вакуумная камера ($P_{\text{осм}} = 10^{-2} \text{ торр}$), 3 –
внеосевая парабола, 4 – мишень, 5 и 6 – ФЭУ с сцинтиллятором NaI,
7 – коллиматор, 8 - фольги

Форма лазерного импульса



Тип «1»

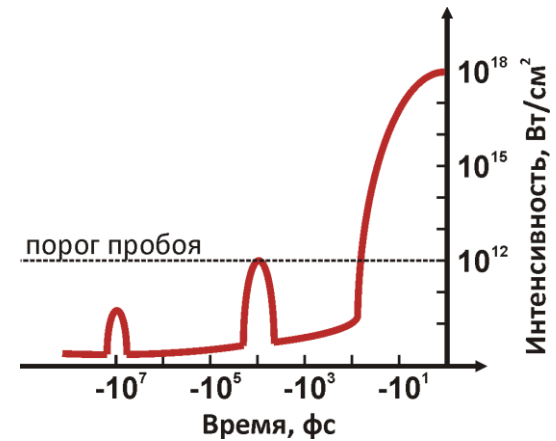
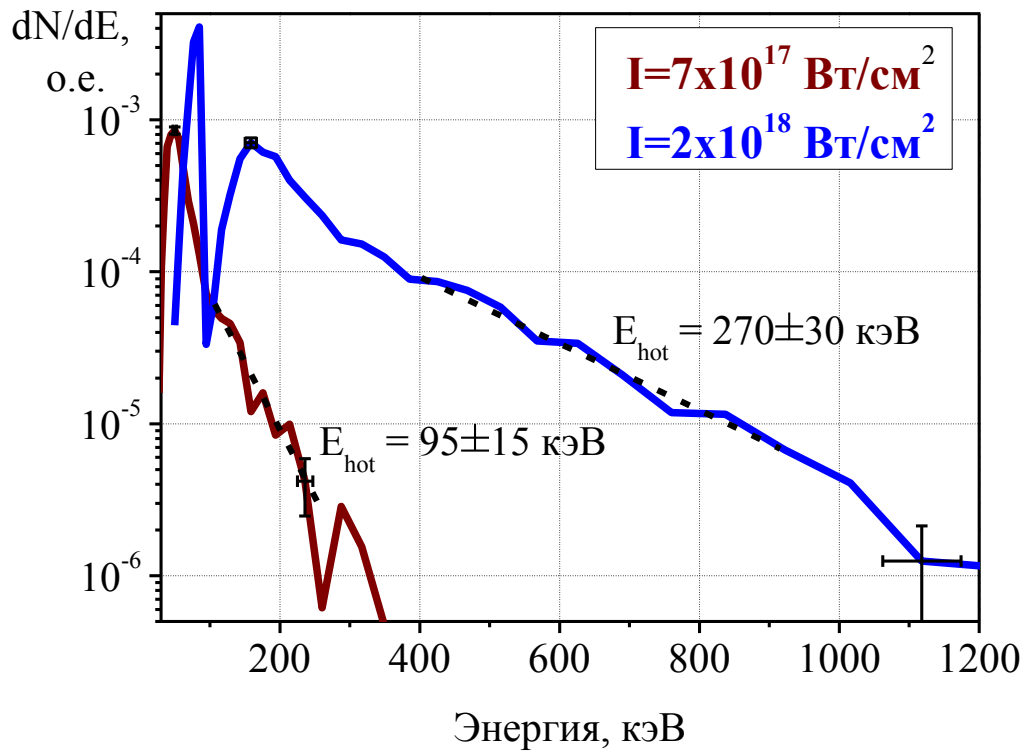
Тип «2»

Тип «3»

Уровень ASE, о.е.		10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁵
Пикосекундный предимпульс	Амплитуда, о.е.	6x10 ⁻⁷	6x10 ⁻⁷	5x10 ⁻³
	Время опережения	12 пс	12 пс	25 пс
Наносекундный предимпульс	Амплитуда, о.е.	5x10 ⁻⁸	3x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁶
	Время опережения	12.5 нс	12.5 нс	12.5 нс

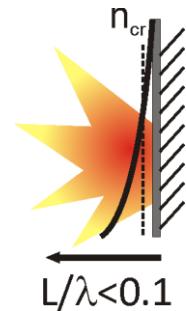
Рентгеновская диагностика плазмы

Тип контраста «1», $\tau=45$ фс, мишень – железо



$$T_e = 710 \tau_{100fs}^{2/9} I_{abs}^{4/9}$$

$$v_s = \sqrt{Z \frac{T_e}{M}}$$



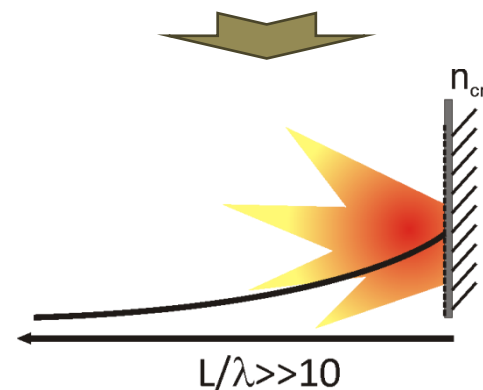
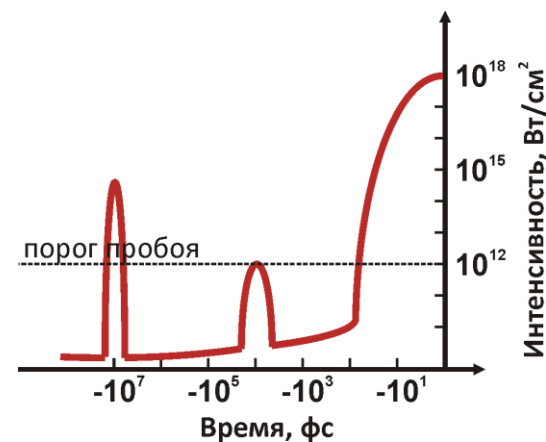
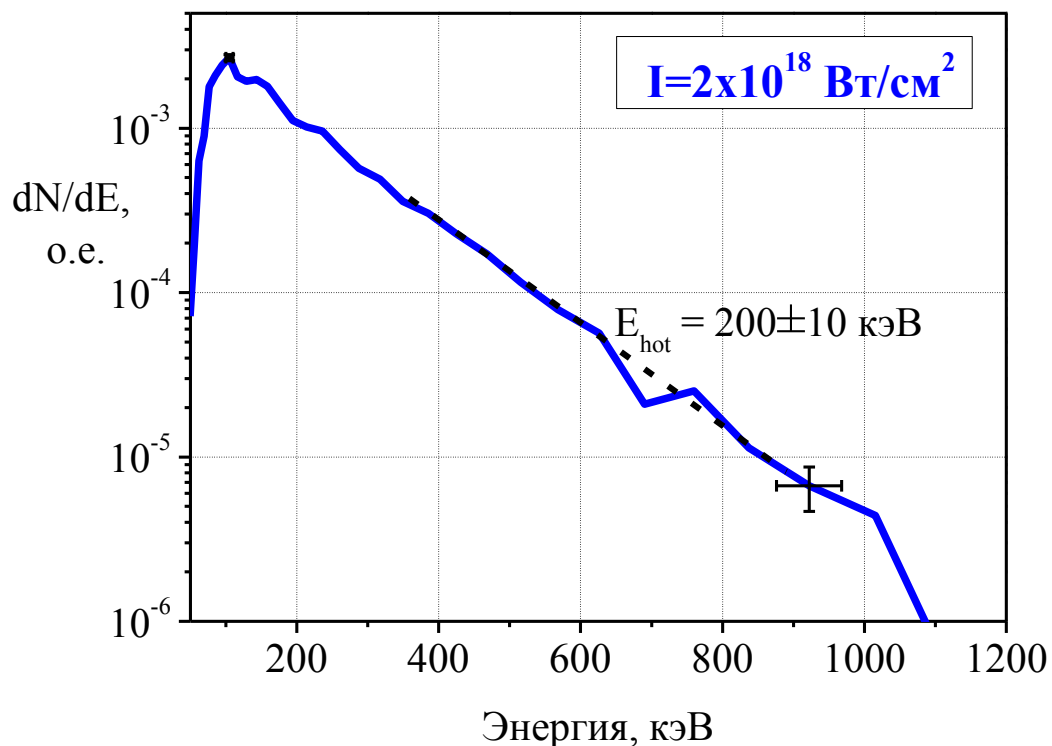
Теор. оценка на энергию электронов: $E_h = 120$ и 300 КэВ

$$E_h = \frac{3}{2} mc^2 \left(\sqrt{1 + I_{18} \lambda_{\mu}^2 / 1.37} - 1 \right)$$

(пондеромоторное ускорение)

Рентгеновская диагностика плазмы

Тип контраста «2», $\tau=45$ фс, мишень – железо

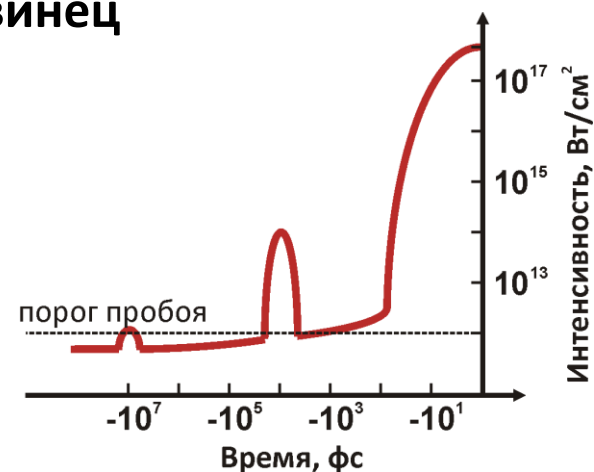
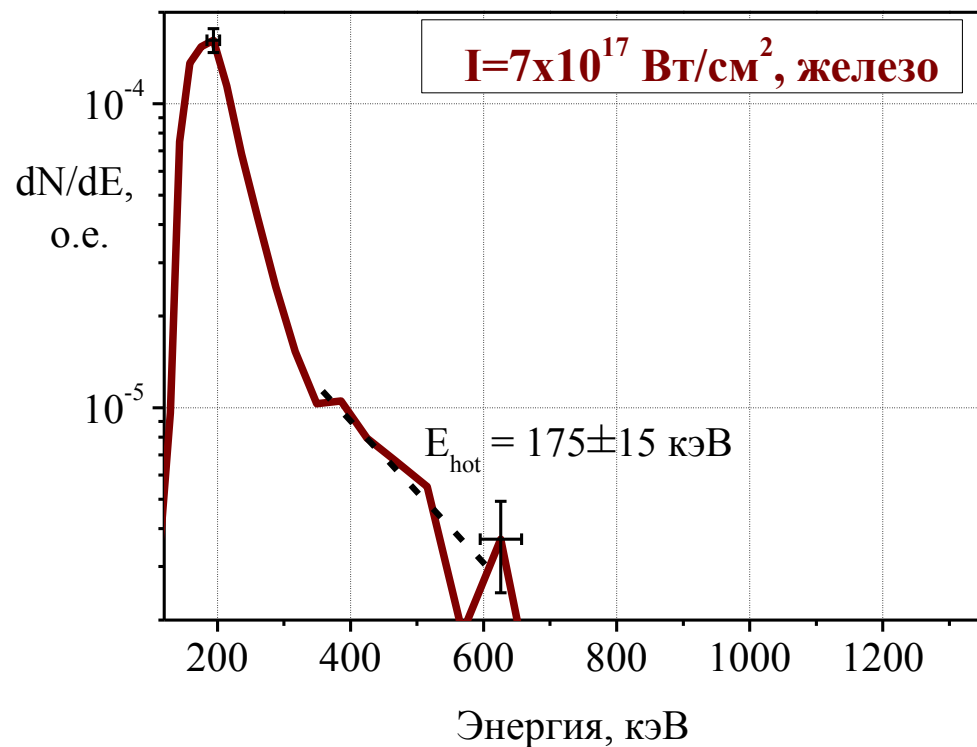


Диссипация энергии в
преплазме малой плотности

P.S. $E_{\text{hot}}=270$ кэВ для импульса «1» (низкий уровень ASE) при $I=2 \times 10^{18} \text{ Вт/см}^2$

Рентгеновская диагностика плазмы

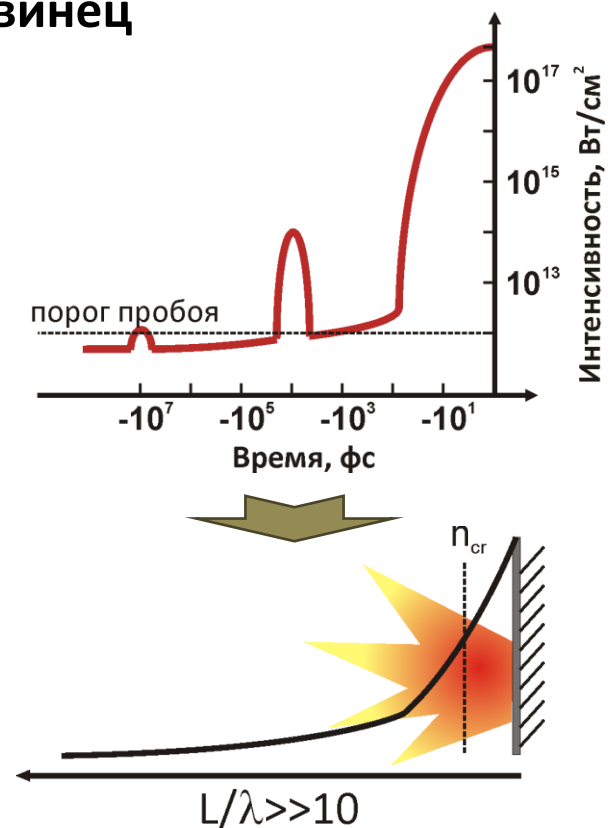
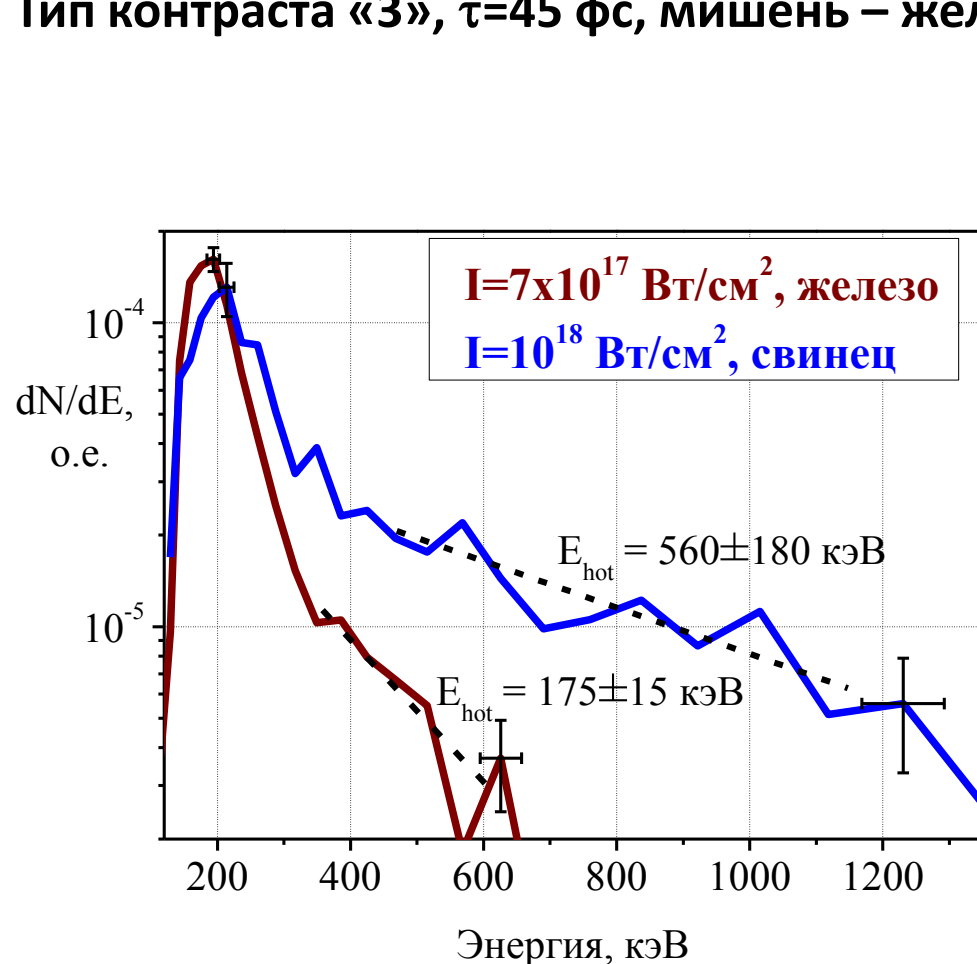
Тип контраста «3», $\tau=45$ фс, мишень – железо, свинец



P.S. $E_{\text{hot}}=95$ кэВ для импульса «1» (низкий уровень ASE) при $I=7 \times 10^{17}$ Вт/см²

Рентгеновская диагностика плазмы

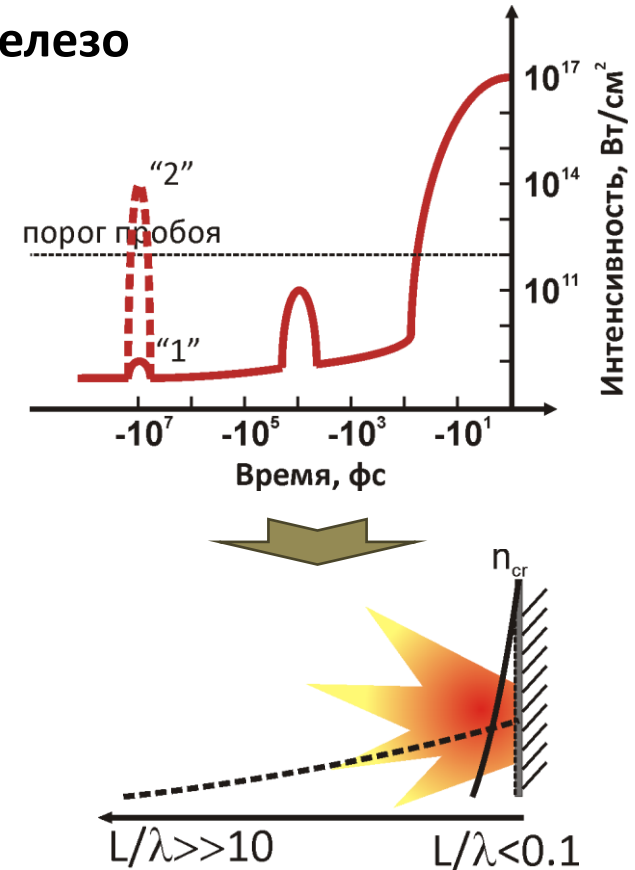
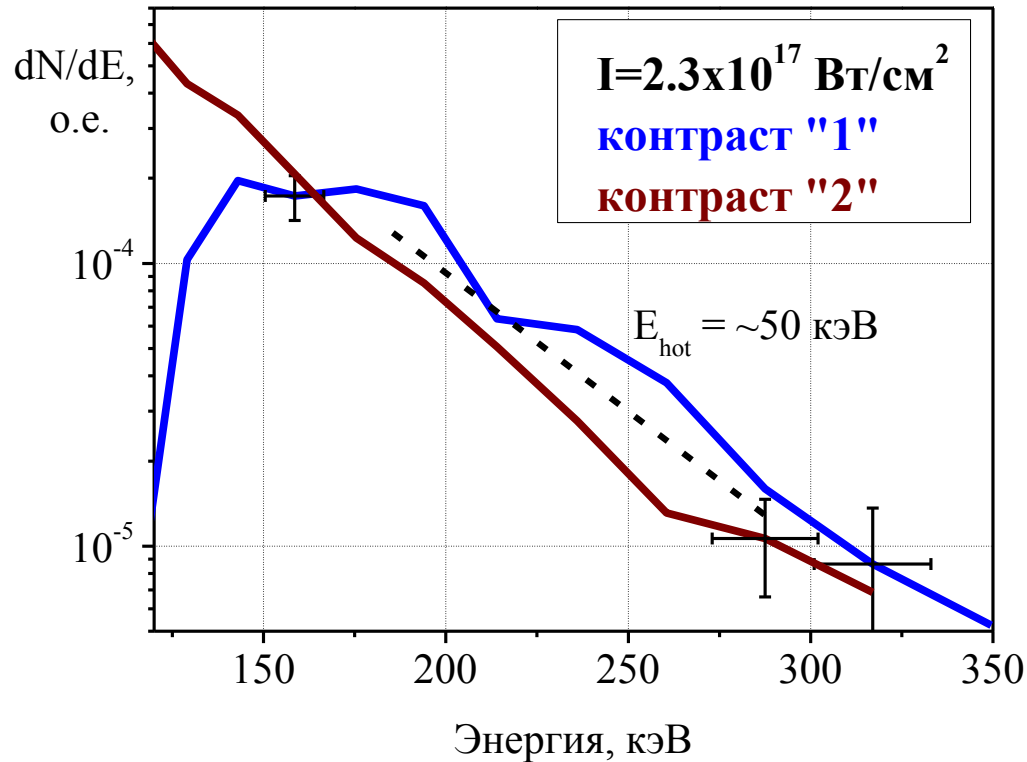
Тип контраста «3», $\tau=45$ фс, мишень – железо, свинец



Ускорение электронов в
 плазменной волне за счёт ВКР
 в области $n=n_{cr}/4$
 $E_{hot} \sim (n/n_{cr}) \times I$

Рентгеновская диагностика плазмы, длинный импульс

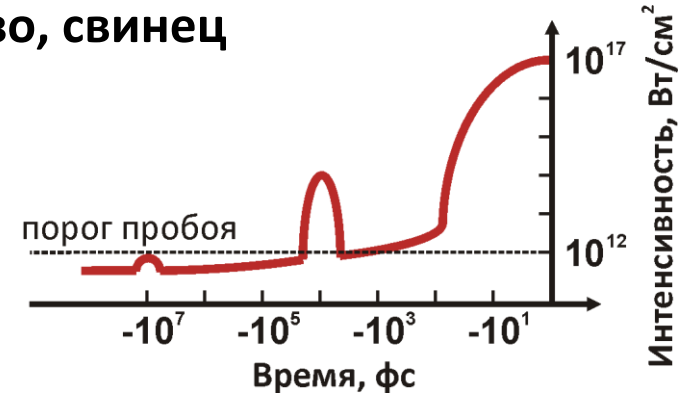
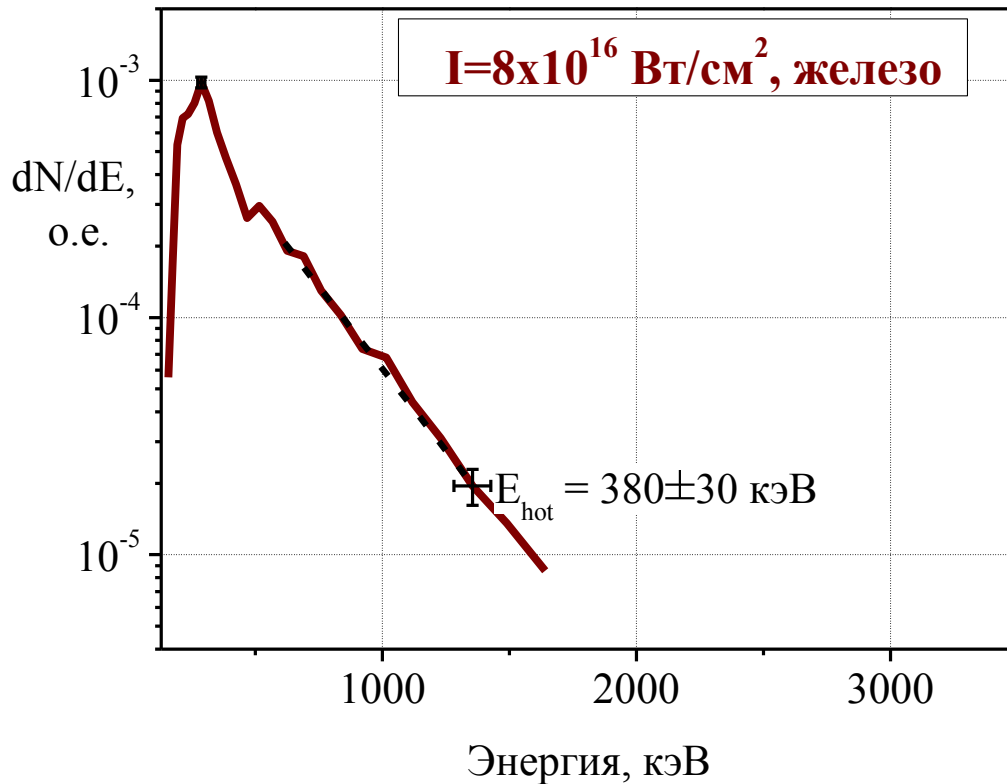
Тип контраста «1» и «2», $\tau=350$ фс, мишень – железо



P.S. $E_{\text{hot}} = 270 \text{ кэВ}$ для импульса «1» (низкий уровень ASE) при 45 фс

Рентгеновская диагностика плазмы, длинный импульс

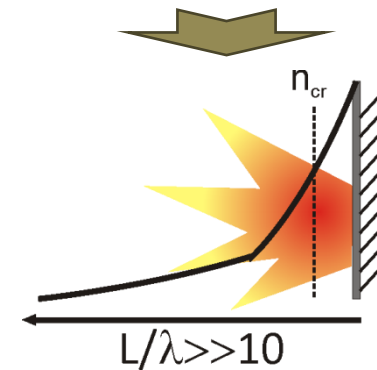
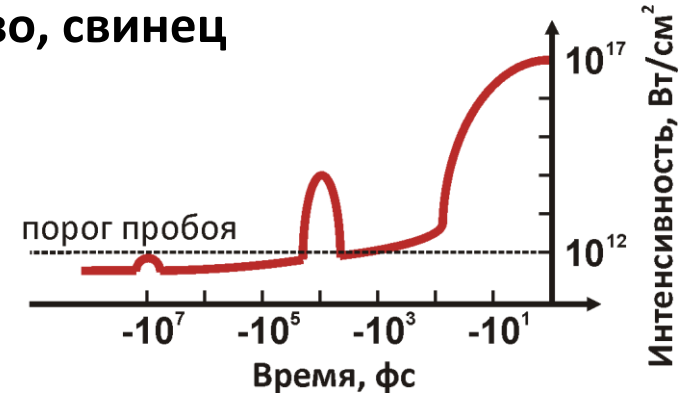
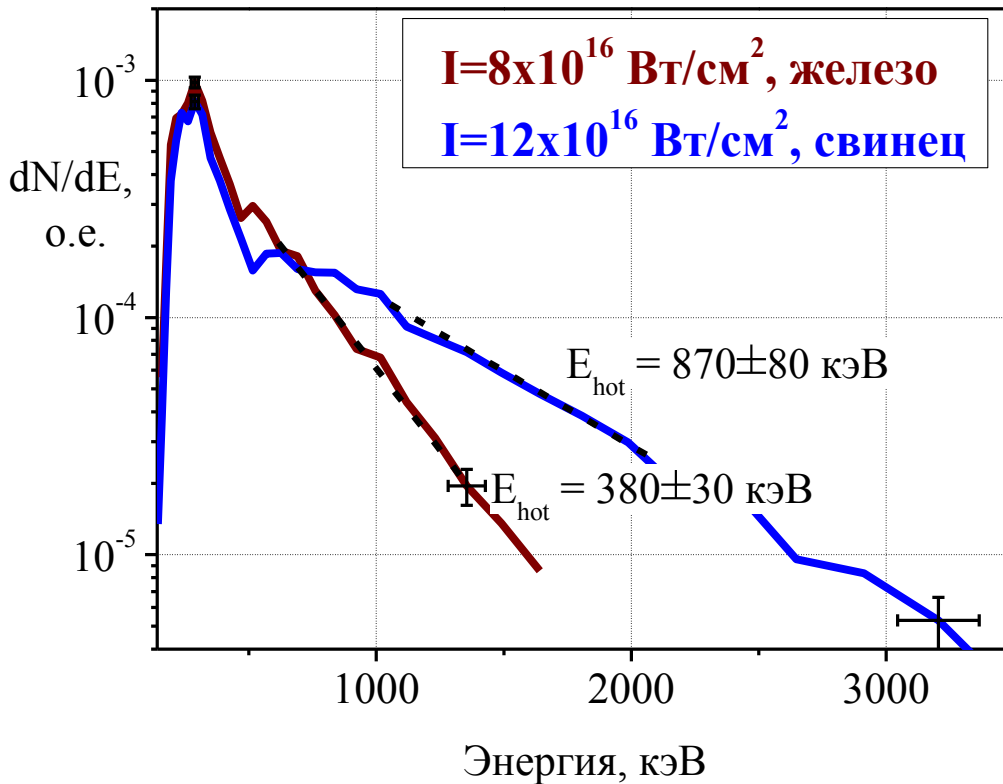
Тип контраста «3», $\tau=350$ фс, мишень – железо, свинец



P.S. $E_{hot}=175$ кэВ для импульса «3» (высокий уровень ASE) при 45 фс

Рентгеновская диагностика плазмы, длинный импульс

Тип контраста «3», $\tau=350$ фс, мишень – железо, свинец



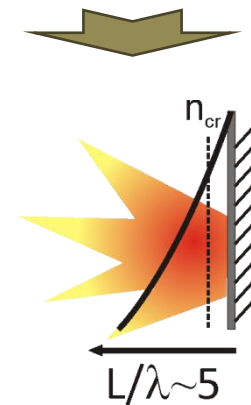
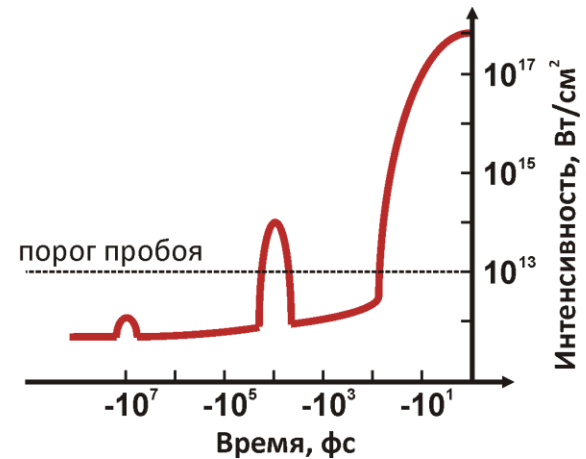
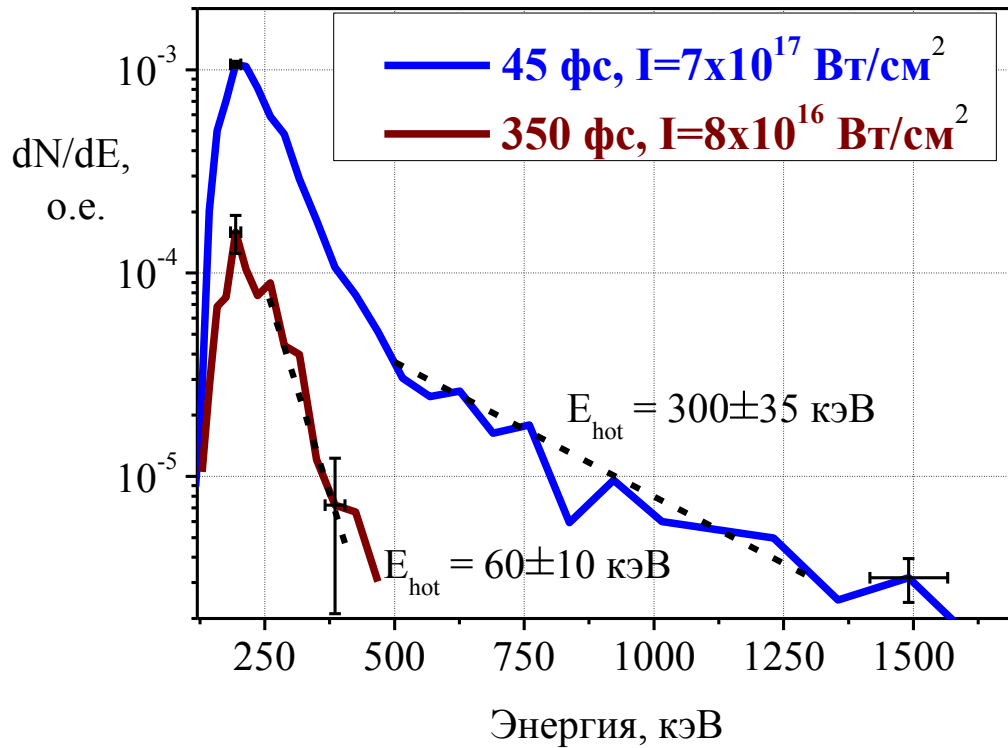
При ускорении в плазменной волне: $E_{hot} \sim (n/n_{cr}) \times I$

$$E_{hot, 45 \text{ фс}} > E_{hot, 350 \text{ фс}}$$

Появление нового быстрого электронного компонента в области субкритической плотности

Рентгеновская диагностика плазмы

Тип контраста «3», мишень – плавленный кварц

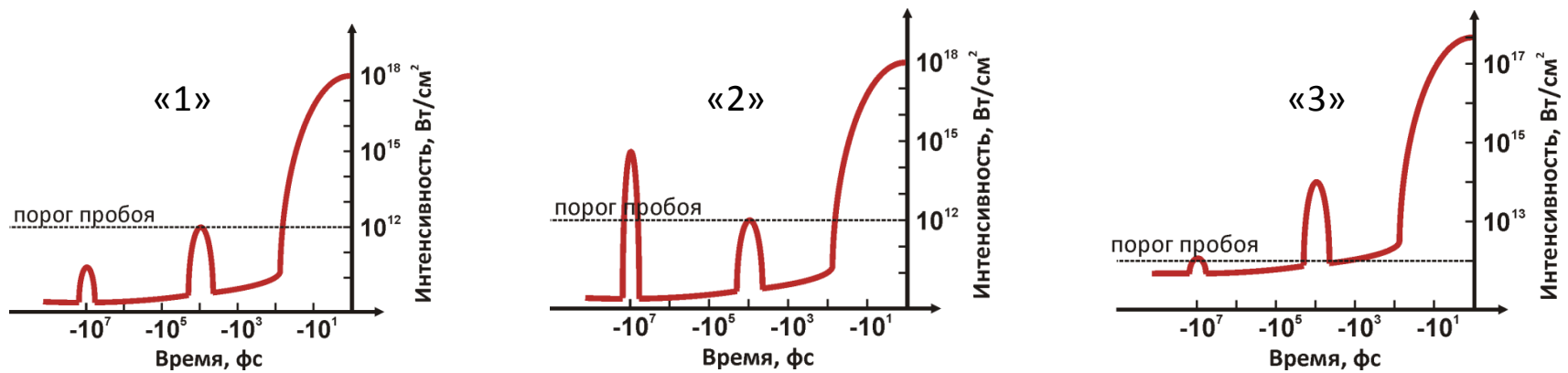


Теор. оценка на энергию электронов
 при $I=7 \times 10^{17}$ Вт/см²: $E_h = 250$ кэВ

$$E_h = \frac{3}{2} 215 (I_{18} \lambda_{\mu}^2)^{1/3}$$

(резонансное поглощение)

Рентгеновская диагностика плазмы, общие результаты



Тип контраста	Материал мишени	$\tau = \sim 45 \text{ фс}$		$\tau = \sim 350 \text{ фс}$	
		$I, \text{ Вт/см}^2$	$E_{\text{hot}}, \text{ кэВ}$	$I, \text{ Вт/см}^2$	$E_{\text{hot}}, \text{ кэВ}$
Тип «1»	железо	7×10^{17}	95 ± 15	8×10^{16}	35 ± 5
		2×10^{18}	270 ± 30	2.3×10^{17}	45 ± 5
Тип «2»	железо	2×10^{18}	200 ± 10	2.3×10^{17}	50 ± 5
Тип «3»	железо	7×10^{17}	175 ± 15	8×10^{16}	380 ± 30
	свинец	10^{18}	560 ± 180	1.2×10^{17}	870 ± 80
	плавл. кварц	7×10^{17}	300 ± 30	8×10^{16}	60 ± 10

Теневое фотографирование плазмы

Греющий импульс:

длительность: **50 фс**;

длина волны: **800 нм**;

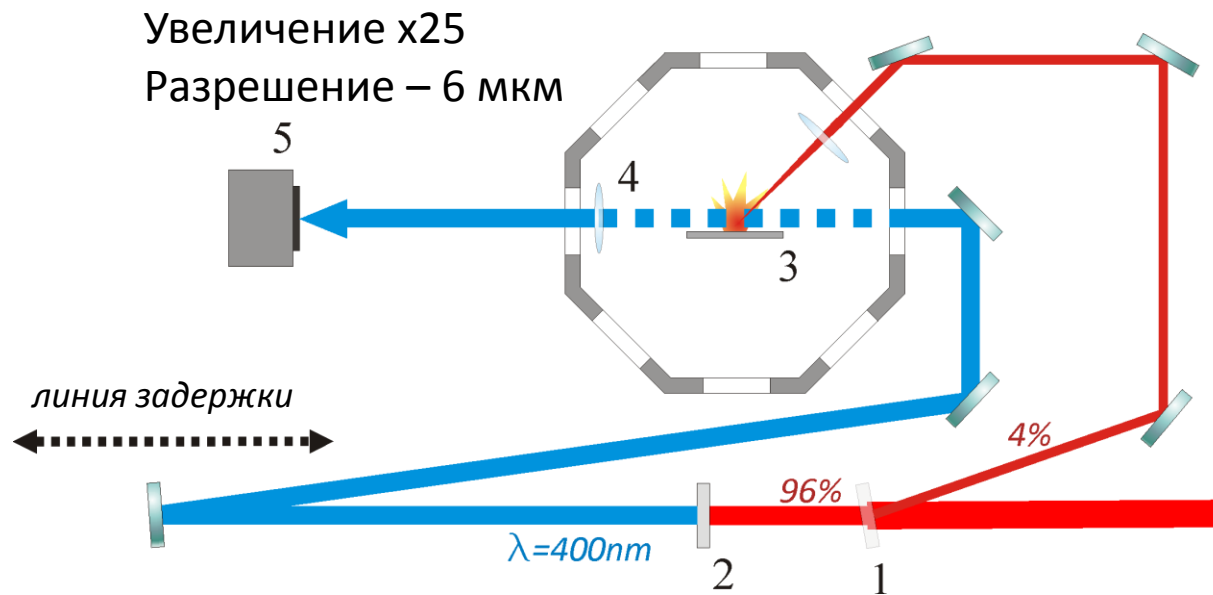
энергия импульса: **150 мкДж**

Сканирующий импульс:

длина волны: **400 нм**;

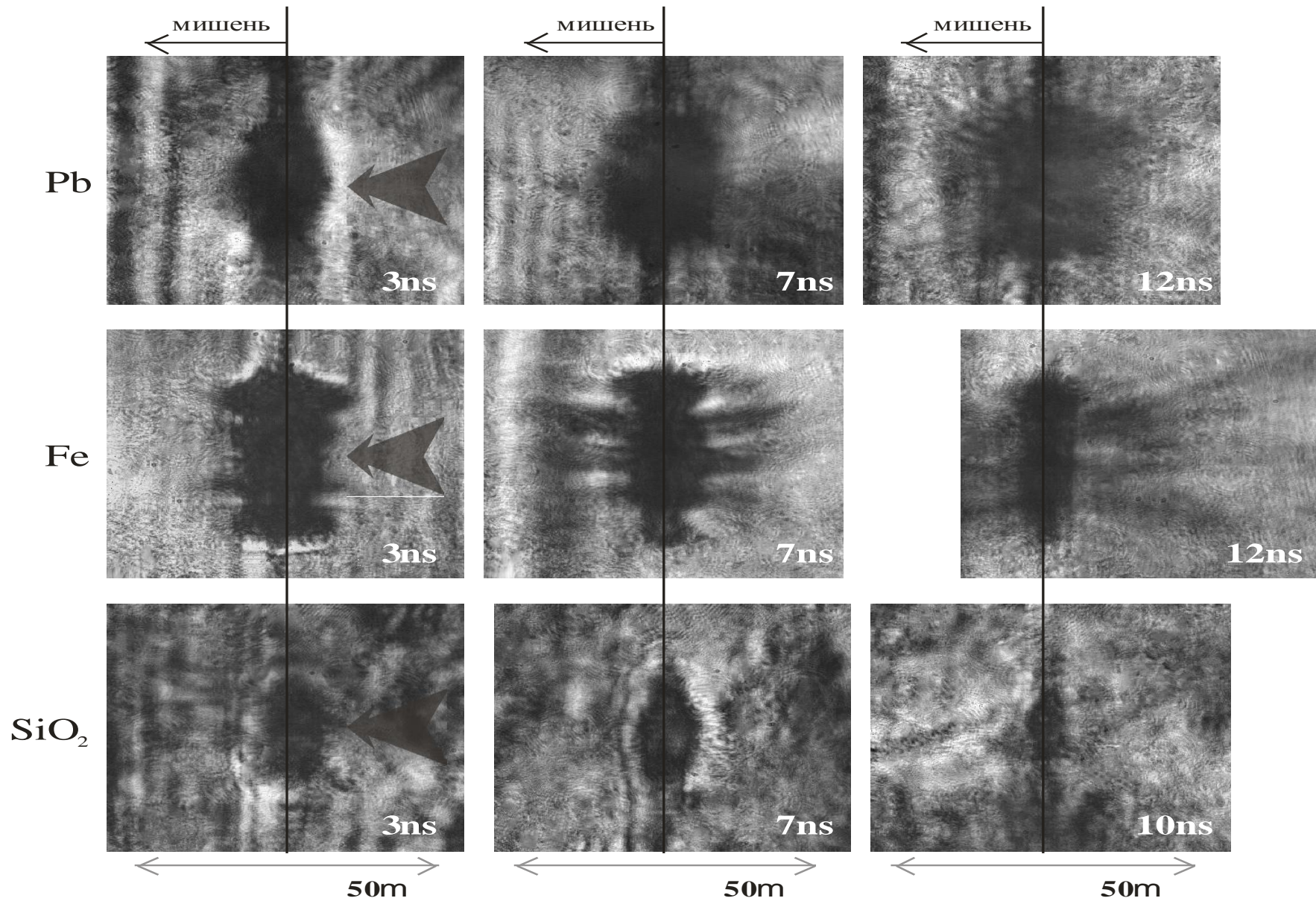
задержка относительно

греющего импульса: **0 – 15 нс**.



1 – делительная пластина, 2 – КВГ, 3 – мишень, 4 – объектив, 5 – ПЗС-камера

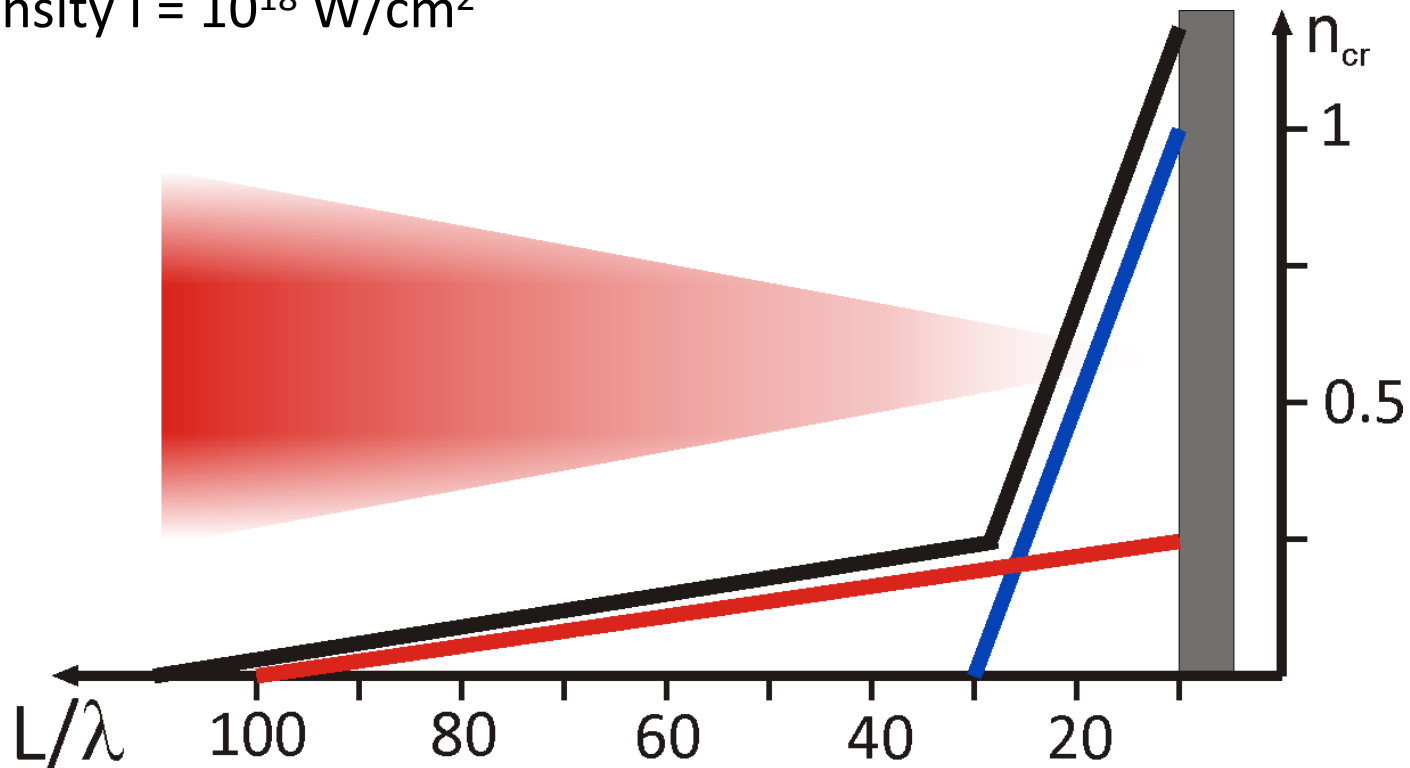
Формирование облака преплазмы



2D PIC modeling with Mandor code

Laser pulse

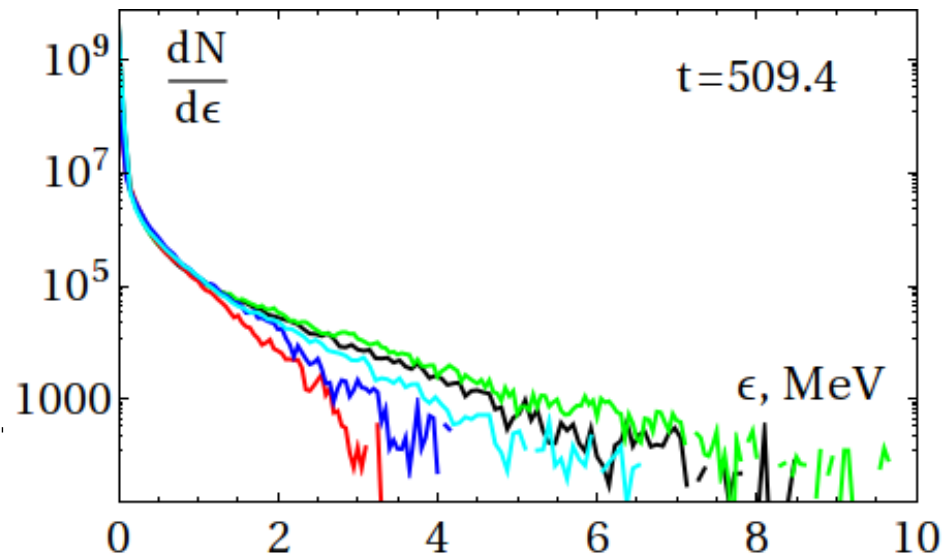
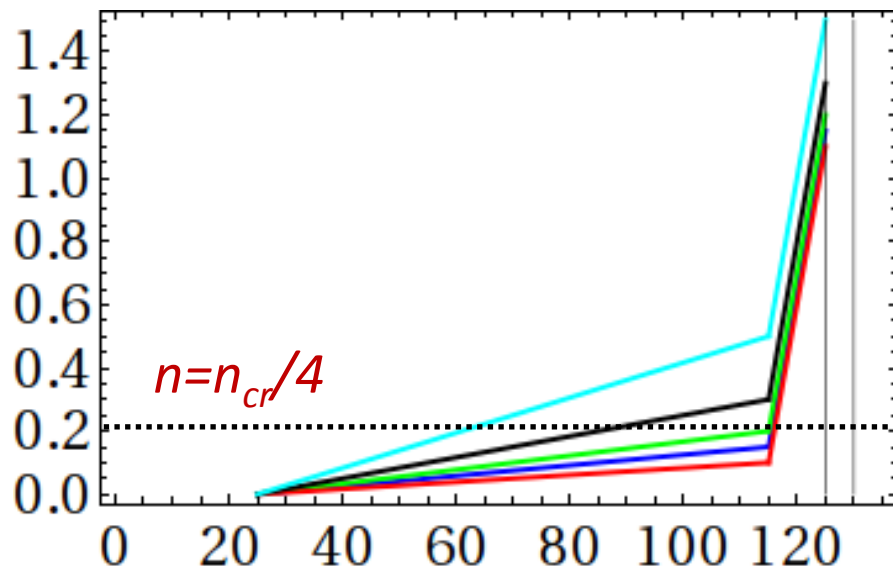
- Pulse duration 50 and 300 fs
- Plasma focal spot– 4 mcm
- Intensity $I = 10^{18}$ W/cm²



2D PIC modeling with Mandor code

Laser pulse

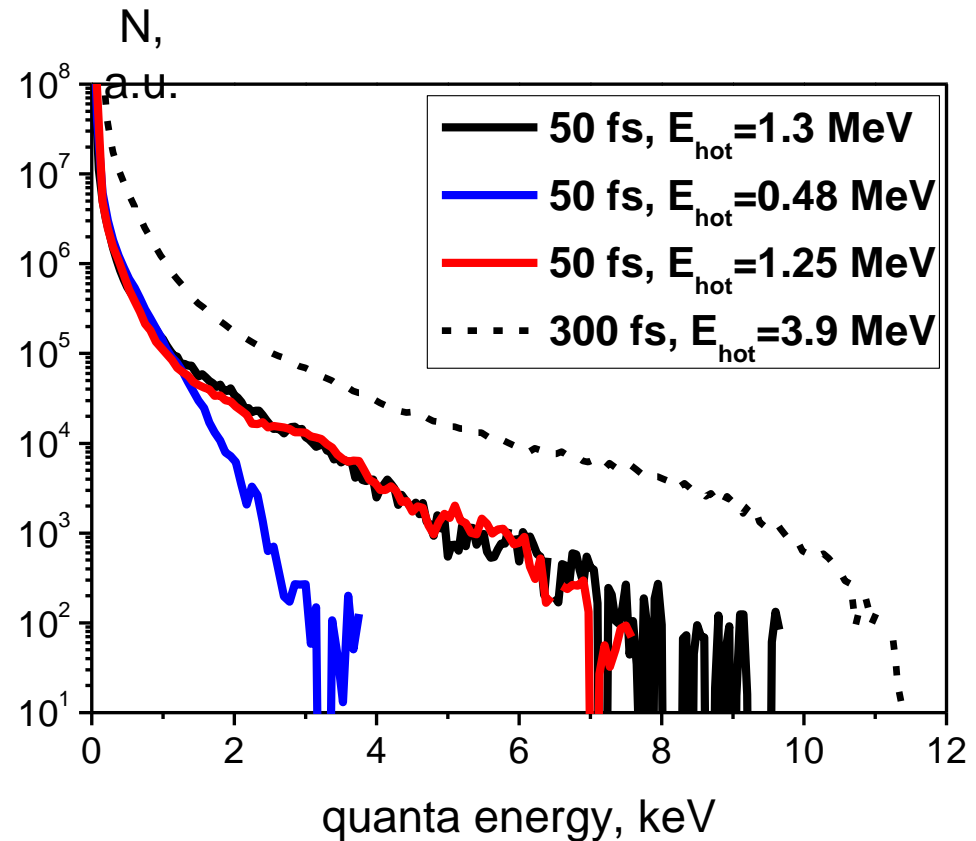
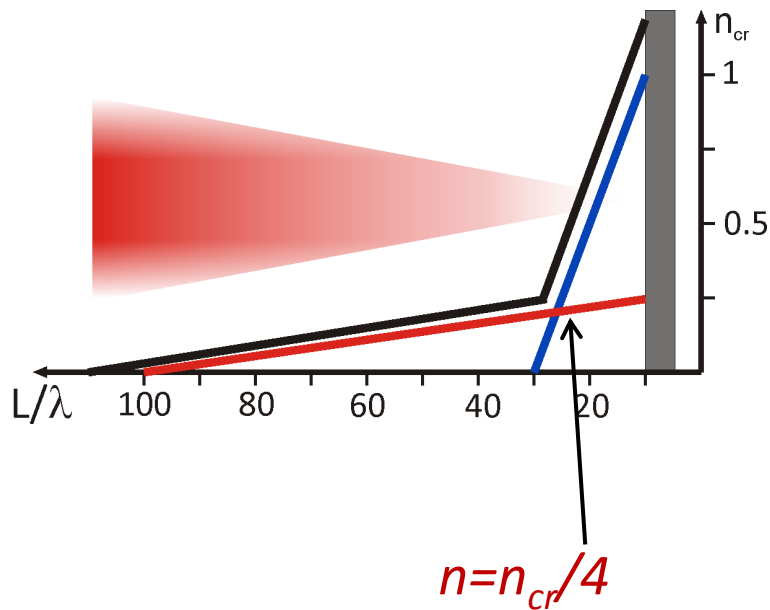
- Pulse duration 50
- Plasma focal spot– 4 mcm
- Intensity $I = 10^{18}$ W/cm²



2D PIC modeling with Mandor code

Laser pulse

- Pulse duration 50 and 300 fs
- Plasma focal spot– 4 mcm
- Intensity $I = 10^{18}$ W/cm²



Планы и перспективы

- Увеличение интенсивности до 10^{19} Вт/см² и выше
- Увеличение контраста до 10^{10} и лучше
- Использование специального наносекундного импульса для создания преплазмы
- Исследование лазерно-индуцированных ядерных процессов (γ, n), $(d(p), n)$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ