



Восьмые Черенковские Чтения

Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц

Оптимизация лазерно- плазменных импульсных гамма- источников нового поколения

Иванов К.А., Шуляпов С.А., Цымбалов И.Н.,
Крестовских Д.А., Савельев-Трофимов А.Б.^[1],
Русаков А.В., Джилкибаев Р.М., Недорезов В.Г.^[2],
Брантов А.В., Ксенофонтов П.А., Быченков В.Ю.^[3]

^[1] *Физический Факультет и Международный Лазерный Центр
МГУ им.М.В. Ломоносова*

^[2] *Институт Ядерных Исследований РАН*

^[3] *Физический Институт им. П.Н.Лебедева РАН*

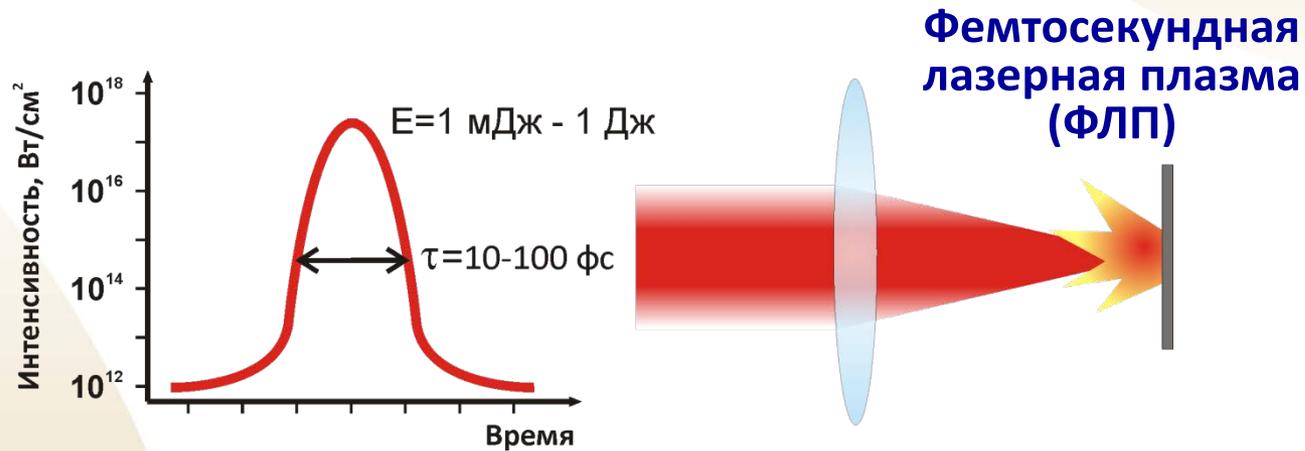


План доклада

- **Релятивистская лазерная плазма: свойства и применение**
- **Экспериментальные результаты:**
 - ускорение частиц в плазме докритической плотности
 - источник на основе жидкой мишени
- **Заключение. Перспективы развития и актуальные приложения**



Лазерная плазма



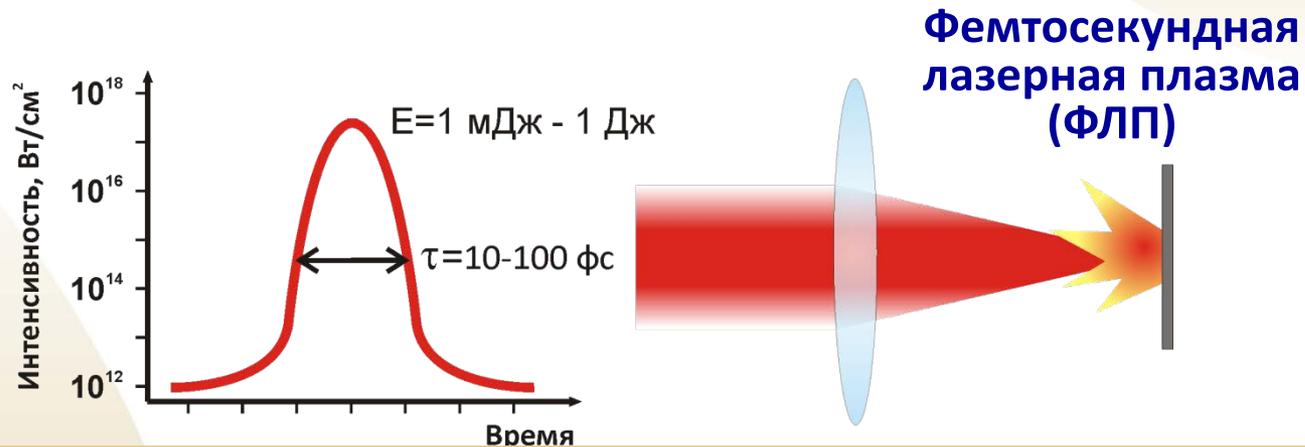
Свойства лазерной плазмы

- Наличие «горячих» электронов (*энергия выше 1 МэВ*)
- Малый размер: $d \sim d_{laser \text{ focus}} (\sim 10 \mu)$
- Малое время свечения: *несколько пикосекунд*
- Спектр свечения в рентгеновском диапазоне:

$$W(T_{hot}, E_{x-ray}) \sim \exp(-E_{x-ray}/T_{hot})$$



Лазерная плазма



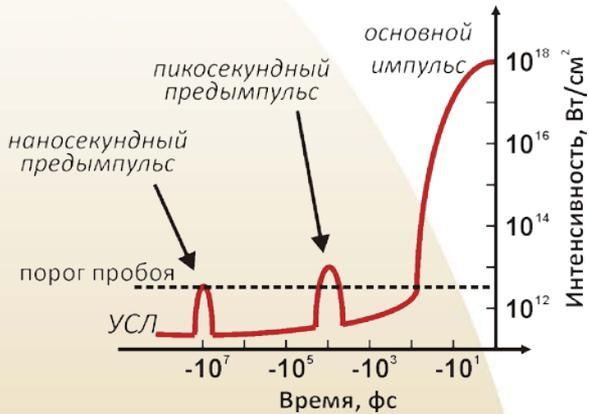
Применения:

- Рентгеновская спектроскопия высокого временного разрешения;
- Дифракционный анализ;
- Радиография;
- Напыление плёнок;
- Инициирование ядерных реакций в плазме;
- Ионная терапия опухолей и т.д.

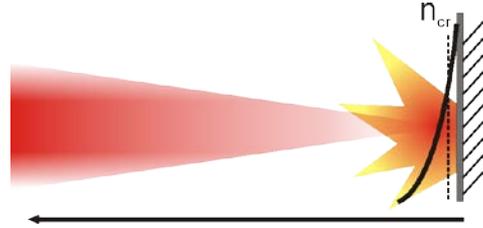


Увеличение яркости источника: варьирование параметров взаимодействия

1. Варьирование контраста лазерного импульса

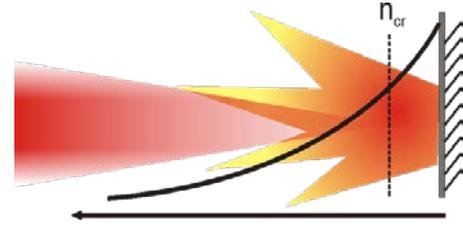


**«Высокий» контраст -
резкая граница
мишени**



**Высокая плотность
плазмы, но низкое
поглощение излучения**

**«Низкий» контраст -
размытая граница
мишени**

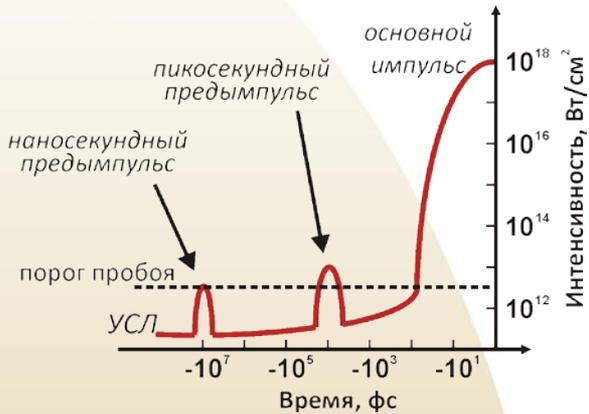


**Увеличенное поглощение
в объеме, но невысокая
плотность частиц**

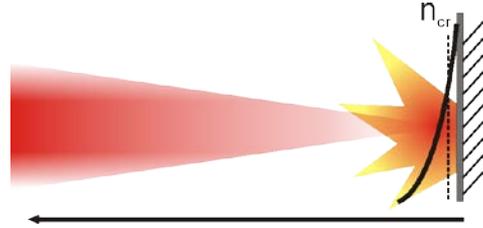


Увеличение яркости источника: варьирование параметров взаимодействия

1. Варьирование контраста лазерного импульса

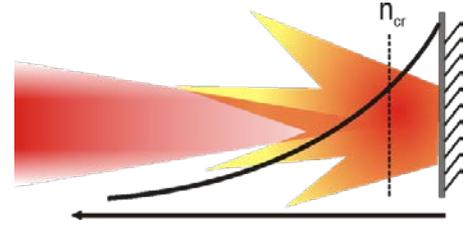


**«Высокий» контраст -
резкая граница
мишени**



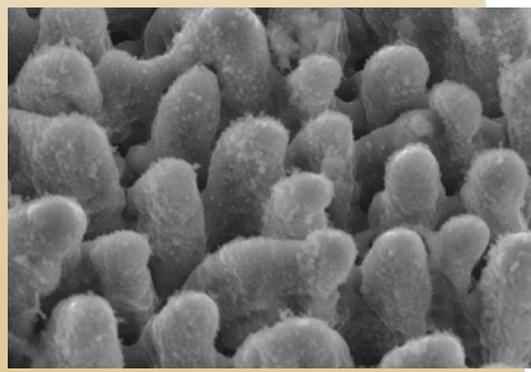
**Высокая плотность
плазмы, но низкое
поглощение излучения**

**«Низкий» контраст -
размытая граница
мишени**



**Увеличенное поглощение
в объеме, но невысокая
плотность частиц**

2. Применение микроструктурированных мишеней



**Существенно большая
площадь поверхности**

**Эффекты усиления
локального поля**



**(+)Рост энергии и
количества быстрых
частиц**

**(-)Требует высокого
контраста импульса**



План доклада

- **Релятивистская лазерная плазма: свойства и применение**
- **Экспериментальные результаты:**
 - ускорение частиц в плазме докритической плотности
 - источник на основе жидкой мишени
- **Заключение. Перспективы развития и актуальные приложения**

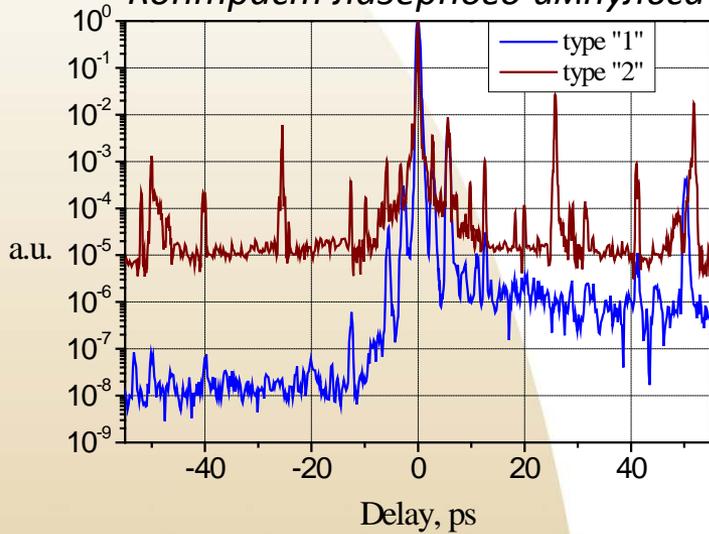


Экспериментальные результаты

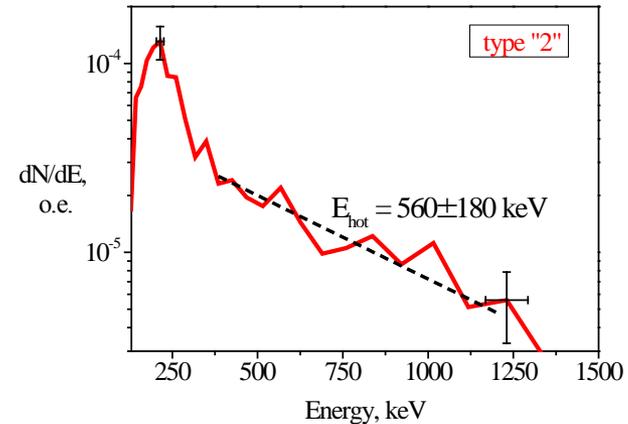
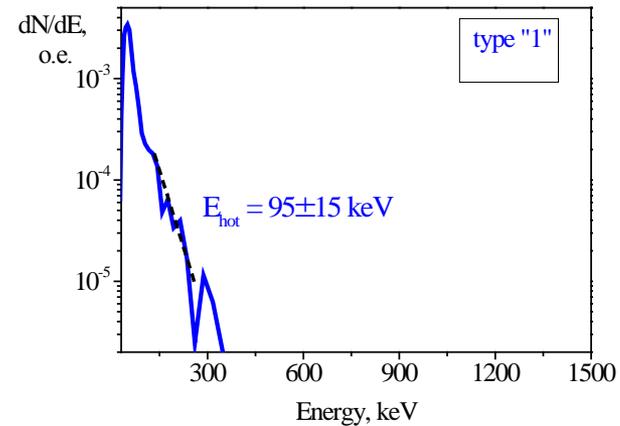
ускорение электронов в докритической плазме

Более ранние исследования:

Контраст лазерного импульса



Спектры гамма-излучения



**Более эффективное ускорение
электронов в протяженном
преплазменном слое**



Экспериментальные результаты

ускорение электронов в докритической плазме

Экспериментальная установка:

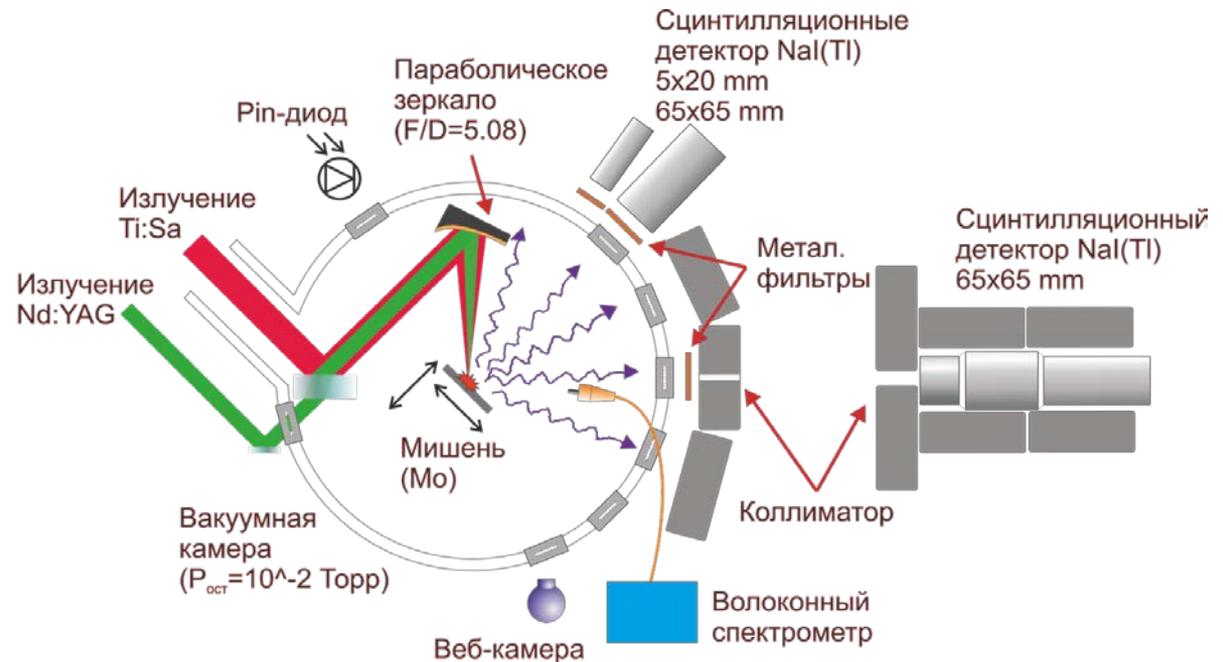
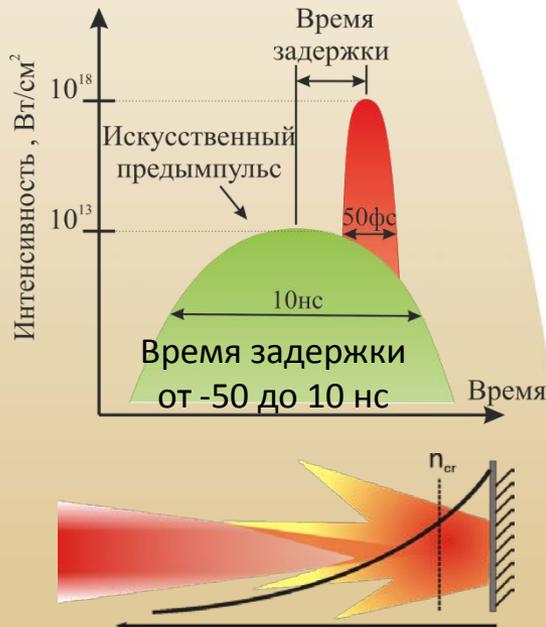
Основной импульс (Ti:Sapphire):

$\tau_{\text{имп}} = 45 \pm 5$ фс; $\lambda = 800$ нм; частота = 10 Гц;
 $E_{\text{имп}} = 10\text{-}30$ мДж; $M^2 = 1.4$; $I_{\text{макс}} \sim 5 \times 10^{18}$ Вт/см²;
 $ASE \sim 10^{-8}$;

Искусственный предимпульс (Nd:YAG):

$\tau_{\text{имп}} = 6$ нс; $\lambda = 532, 1064$ нм;
(синхронизован с Ti:Sa, точность ~ 1 нс);
 $E_{\text{имп}} \sim 100$ мДж; $I \sim 10^{12}$ Вт/см².

Идея:





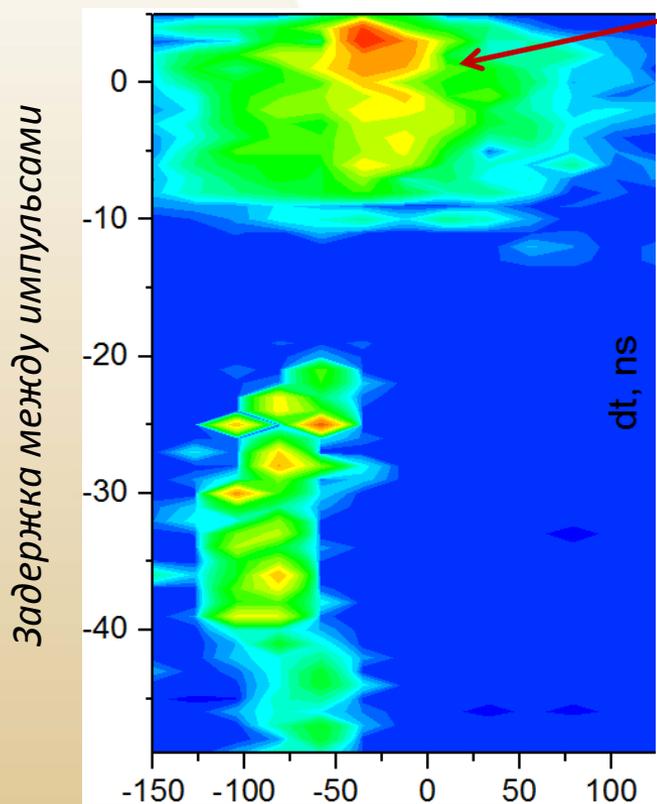
Экспериментальные результаты

ускорение электронов в докритической плазме

Ключевые результаты: гамма-диагностика

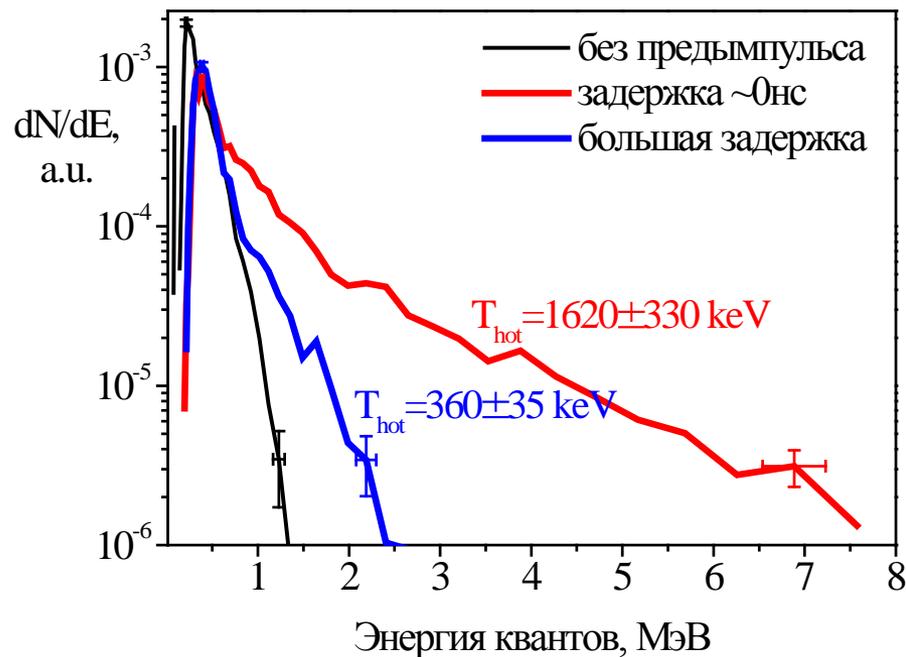
Выход гамма-излучения

Рост почти на два порядка



Сдвиг мишени из фокуса

Спектры гамма-излучения



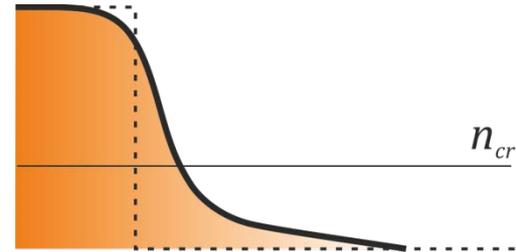
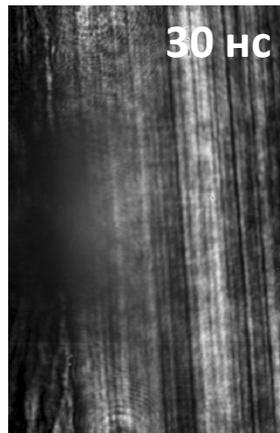
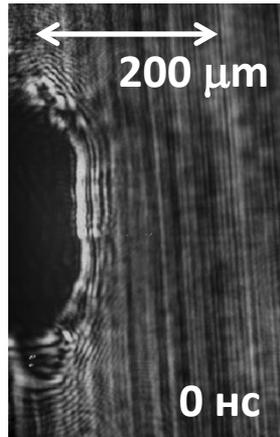
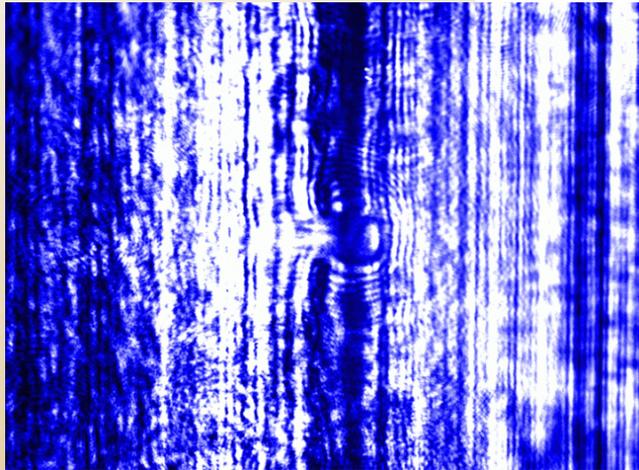


Экспериментальные результаты

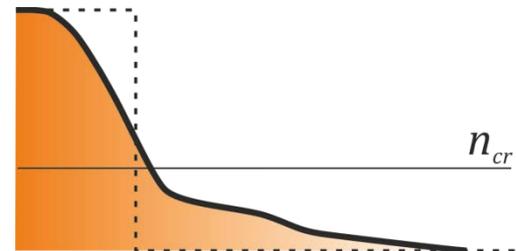
ускорение электронов в докритической плазме

Ключевые результаты: оптическая диагностика

Динамика плазменного факела



Резкий градиент+протяженный слой



Более размытая преплазма

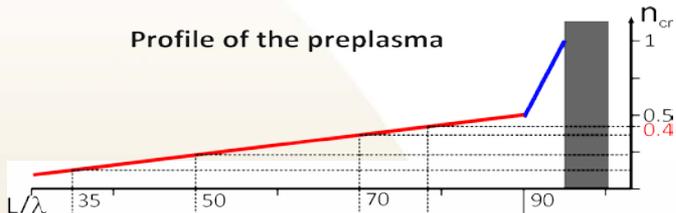


Экспериментальные результаты

ускорение электронов в докритической плазме

Ключевые результаты: численное моделирование лазерно-плазменного взаимодействия

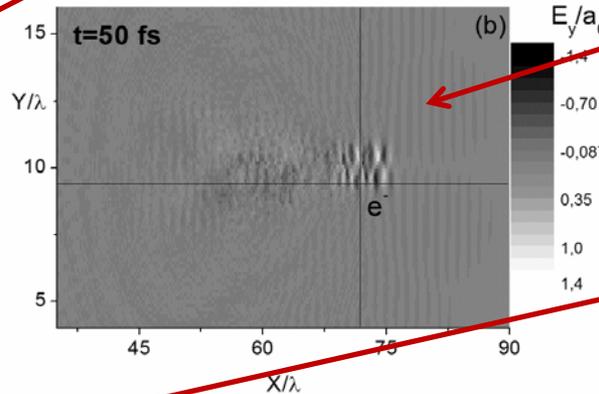
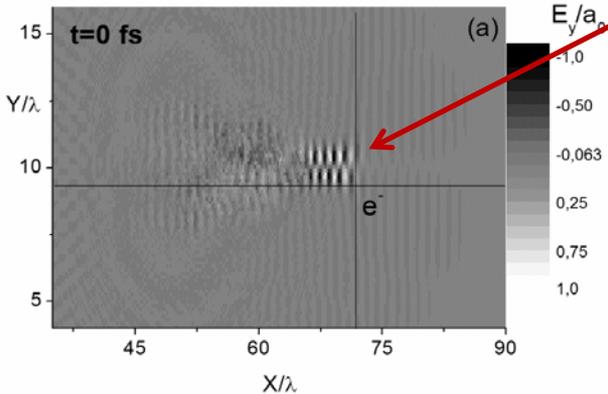
Profile of the preplasma



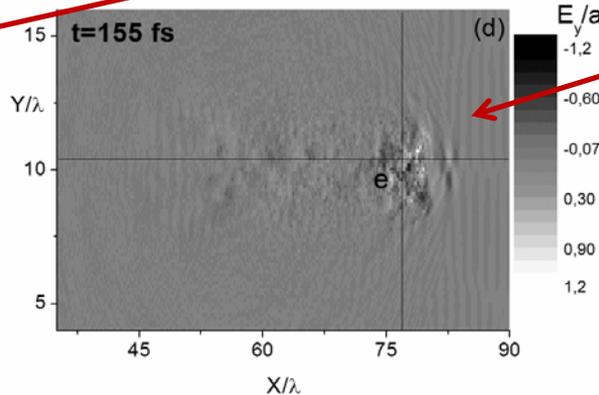
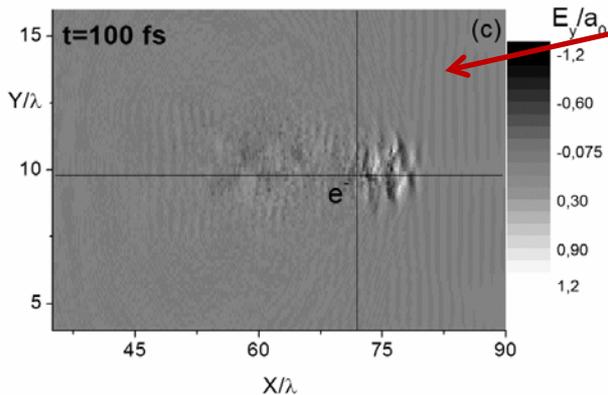
1. Самофокусировка

2. Возбуждение
плазменной
волны

Map of the transverse E-field



3. Усиление волны при
параметрических
процессах



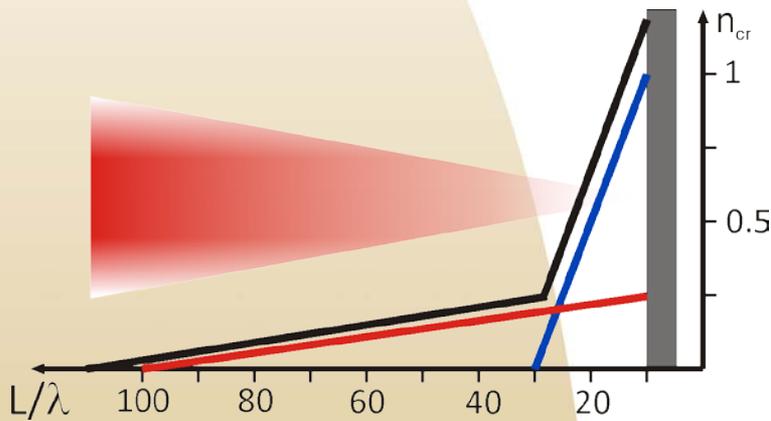
4. Опрокидывание
волны и формирование
электронного пучка



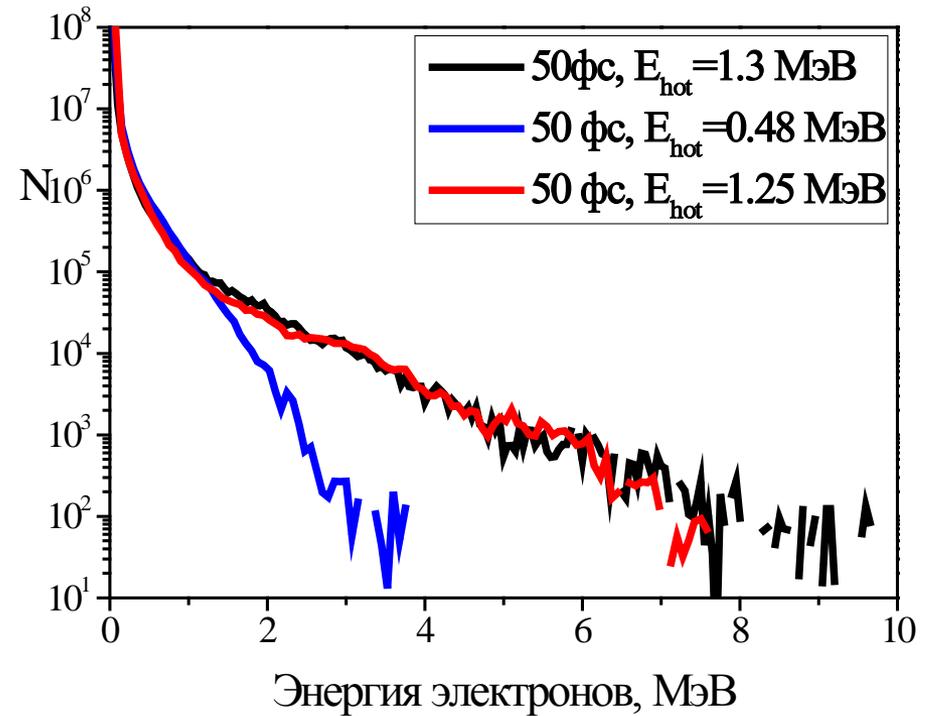
Экспериментальные результаты

ускорение электронов в докритической плазме

Ключевые результаты: численное моделирование лазерно-плазменного взаимодействия



Расчетные спектры электронов



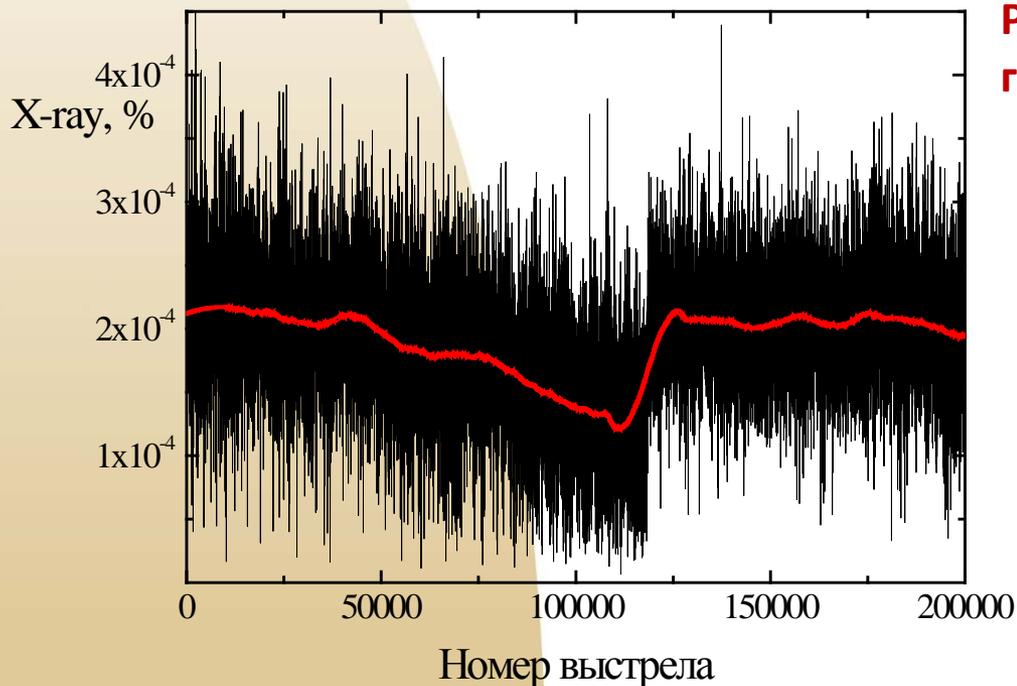


Экспериментальные результаты

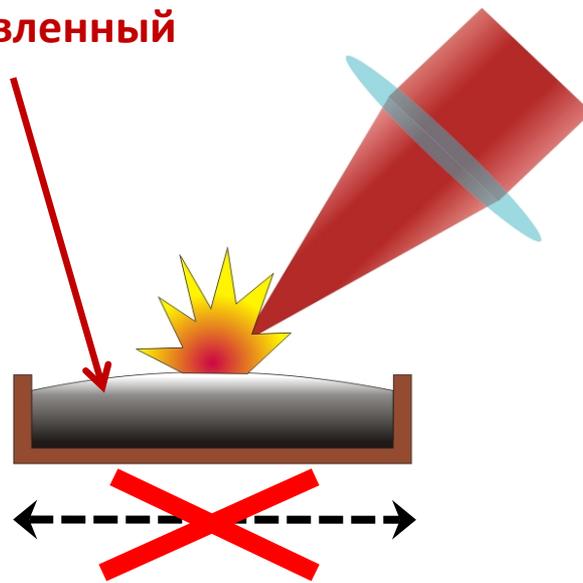
применение жидкой мишени

Преимущества жидкой мишени (галлий @300°C):

- быстрое восстановление поверхности мишени
- простота мишенного узла
- высокая стабильность от выстрела к выстрелу



Расплавленный галлий

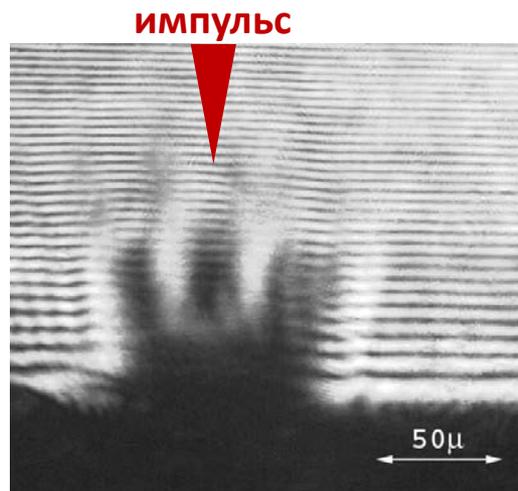
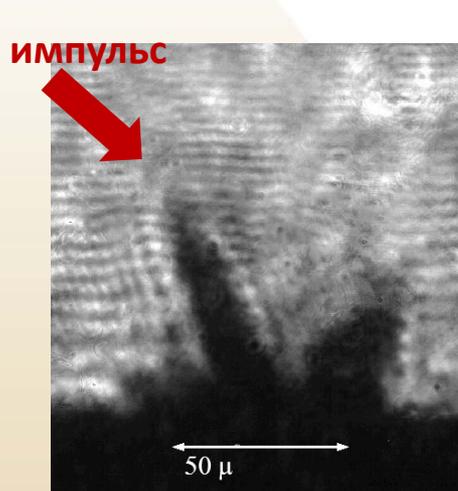




Экспериментальные результаты

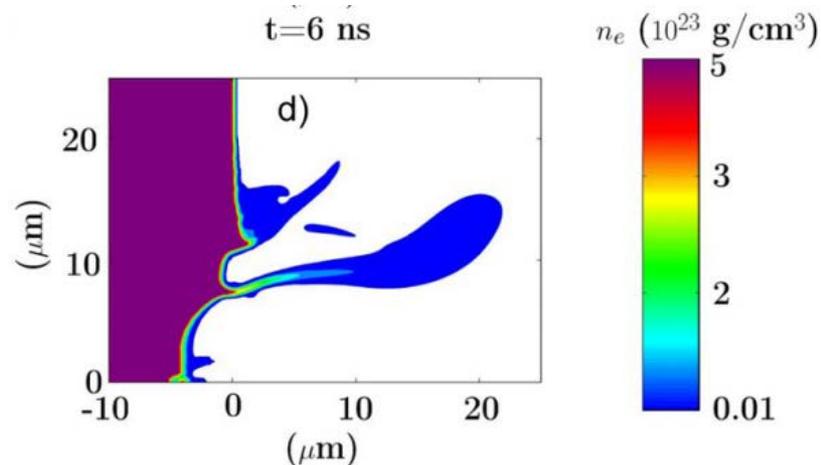
применение жидкой мишени

Формирование микроструй на поверхности жидкой мишени



Оптическая диагностика:
образование струй под действием
фемтосекундного импульса на
временах порядка 10 нс

Численный расчёт:
Причина образования – неравномерность
распределения и горячие точки в фокусе
излучения

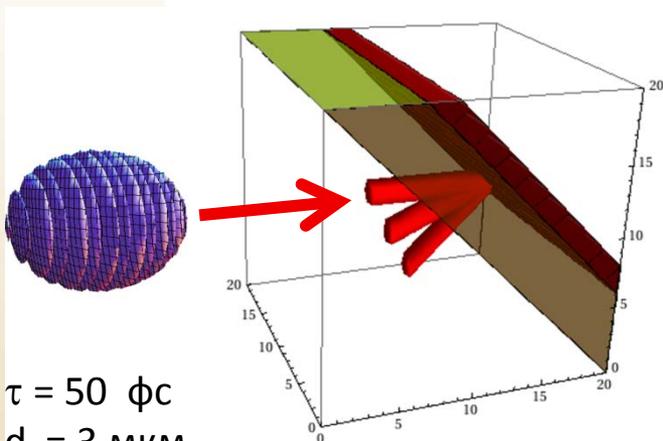




Экспериментальные результаты

применение жидкой мишени

Усиление локального поля на плазменных микроструях



- $\tau = 50$ фс
- $d_f = 3$ мкм
- $I_{\max} = 10^{18}$ Вт/см²

Спектры электронов
при 10^{18} Вт/см²

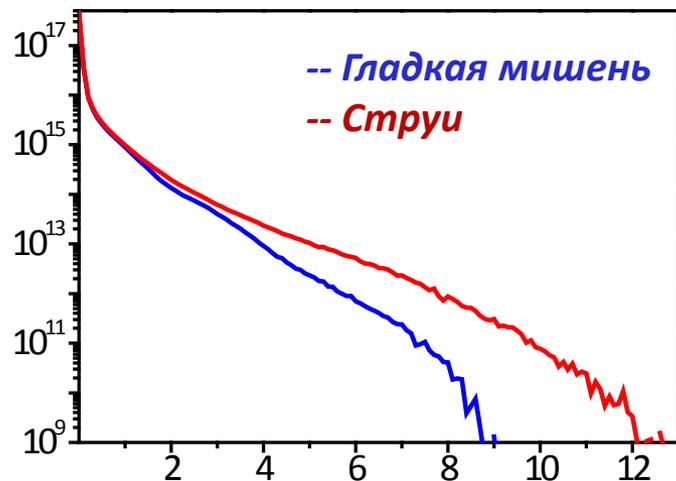
Усиление локальных
полей на остриях струй

Параметры мишени

Подложка: протоны+электроны, $d = 1$ мкм, $n=2n_{cr}$

Преплазма: $d = 4$ мкм, $0 < n < 2n_{cr}$

Струи: $l = 10$ мкм, $d = 2$ мкм, $n=2n_{cr}$



Энергия, КэВ



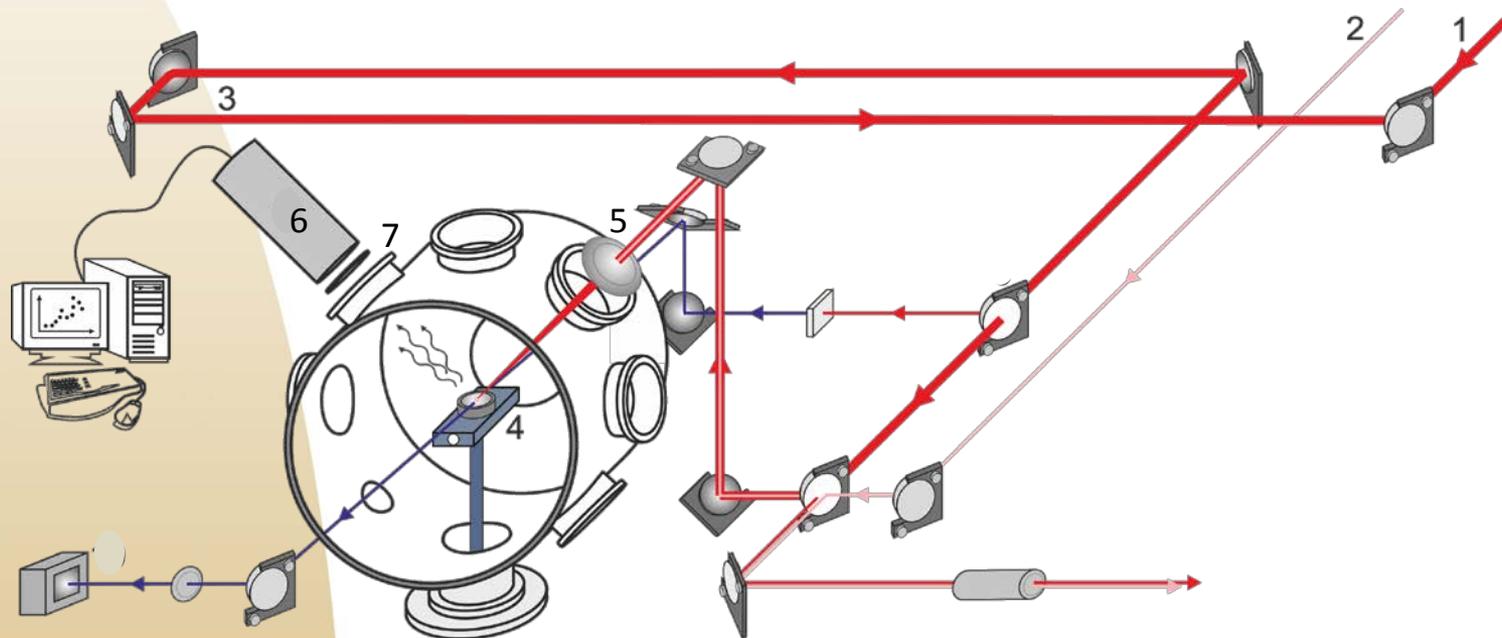
Экспериментальные результаты

применение жидкой мишени

Экспериментальная установка

Параметры импульса: $\tau = 50$ фс; $E = 1-10$ мДж; $I = 10^{17}-10^{18}$ Вт/см²

Параметры предимпульса: $\delta\tau = -3 - 10$ нс; $E = 0 - 150$ мкДж



1 – основной импульс, 2 – лазерный предимпульс, 3 – линия задержки, 4 – кювета, 5 – линза ($F/D=14$), 6 – ФЭУ с сцинтиллятором NaI(Tl), 7 – фильтры (>50 кэВ).



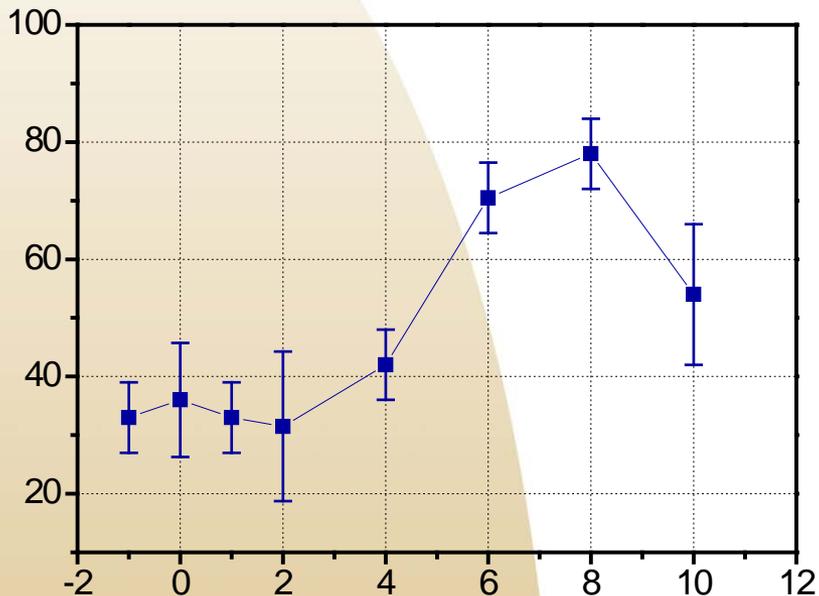
Экспериментальные результаты

применение жидкой мишени

Рентгеновская диагностика плазмы жидкой мишени

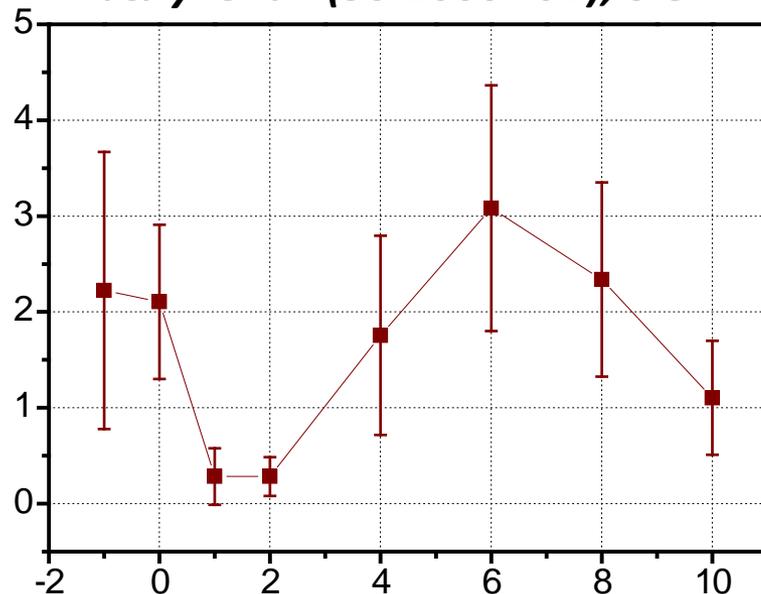
$I=5 \times 10^{16}$ Вт/см²

Энергия горячих электронов, кэВ



*Задержка между импульсом
и предимпульсом, нс*

*Выход рентгеновского
излучения (50-2000 кэВ), о.е.*



*Задержка между импульсом
и предимпульсом, нс*



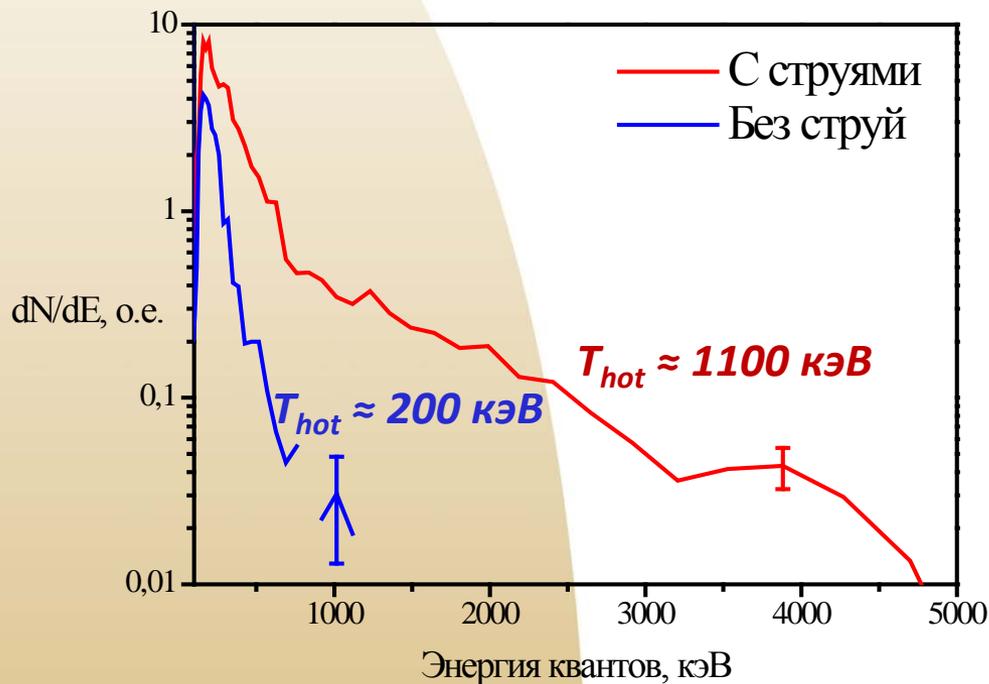
Экспериментальные результаты

применение жидкой мишени

Рентгеновская диагностика плазмы жидкой мишени

$I=10^{18}$ Вт/см²

Спектры гамма-излучения,
задержка 10 нс



Сильное влияние микроструй на ускорение электронов при релятивистской интенсивности



План доклада

- **Релятивистская лазерная плазма: свойства и применение**
- **Экспериментальные результаты:**
 - ускорение частиц в плазме докритической плотности
 - источник на основе жидкой мишени
- **Заключение. Перспективы развития и актуальные приложения**



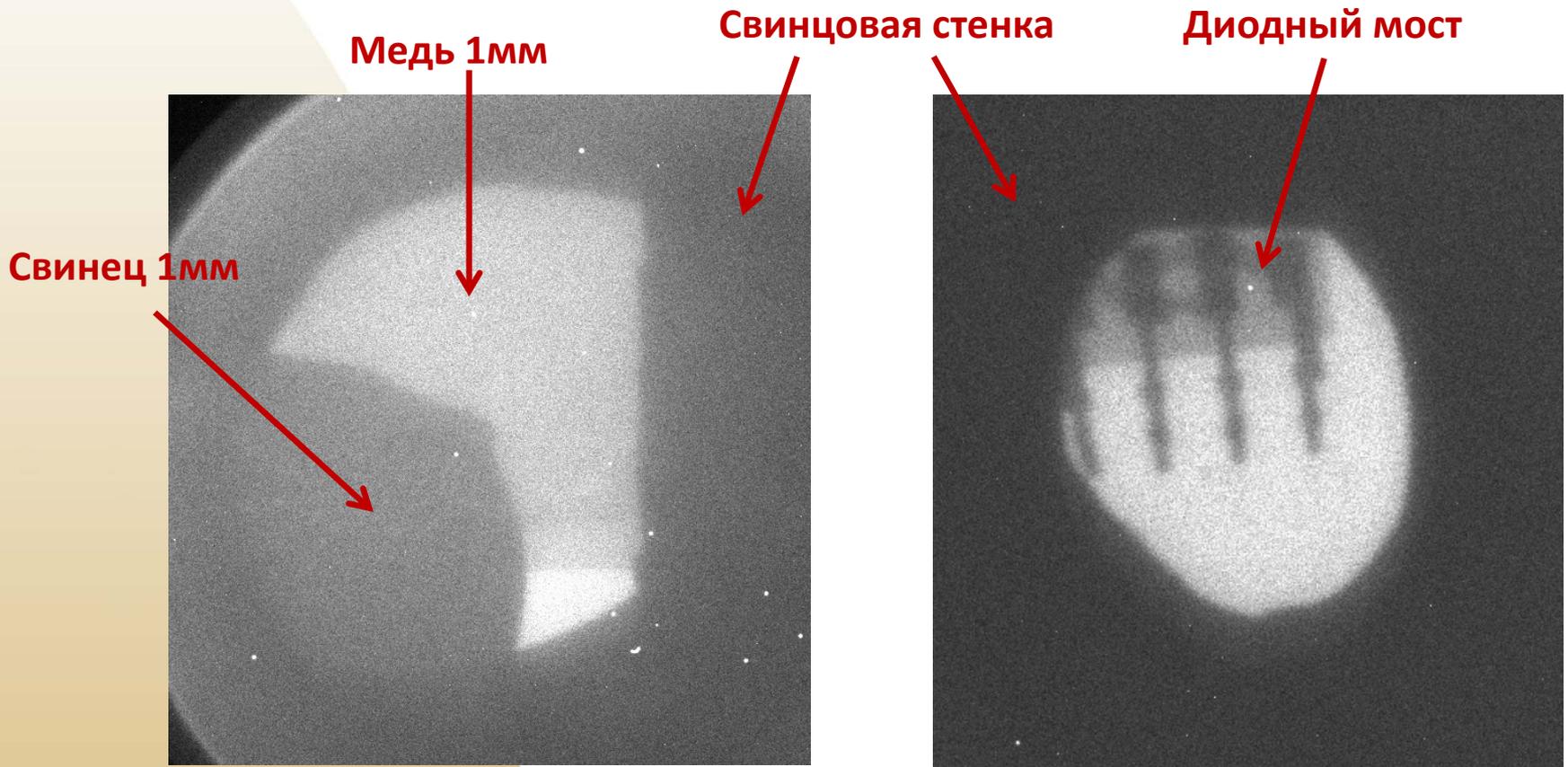
Заключение

- Релятивистская лазерная плазма – уникальный источник электронов и гамма-излучения с сверхмалой длительностью импульса;
- Изменение параметров взаимодействия излучения с веществом (варьирование контраста импульса и преплазменного слоя) позволяет управлять свойствами лазерной плазмы;



Перспективы и приложения

Гамма радиография: исследование плотных объектов пучком гамма-квантов из плазмы

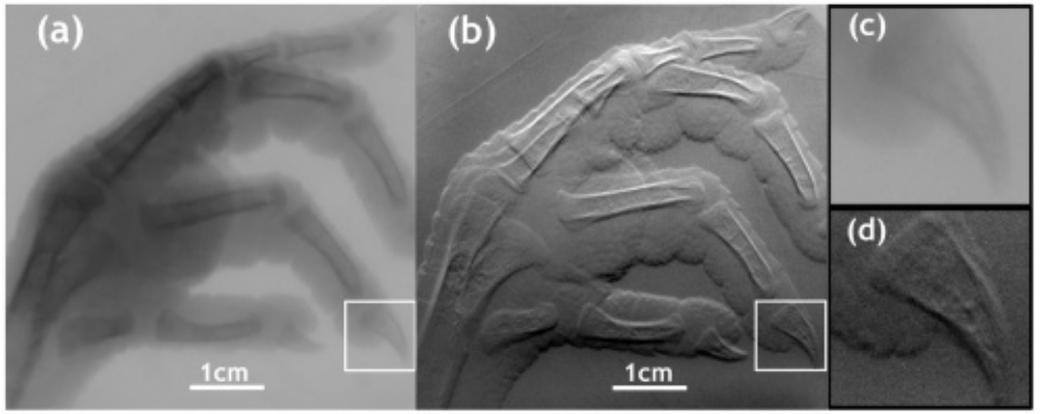
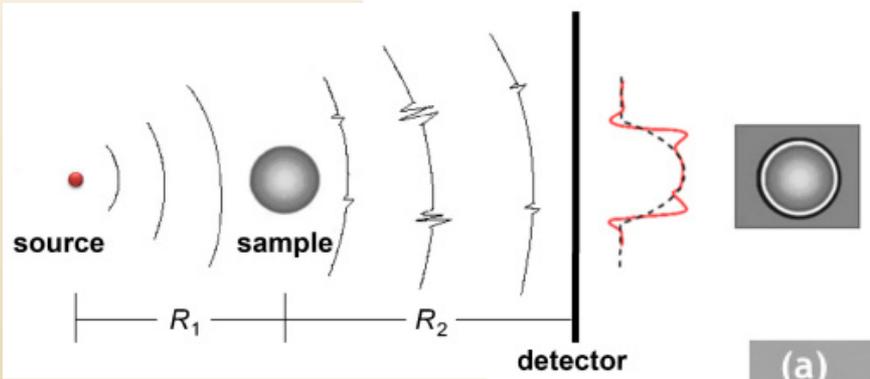




Перспективы и приложения

Построение изображений методом рефракционного контраста

**Высокая пространственная когерентность
потока квантов из плазмы (размер источника 10-100 мкм)**

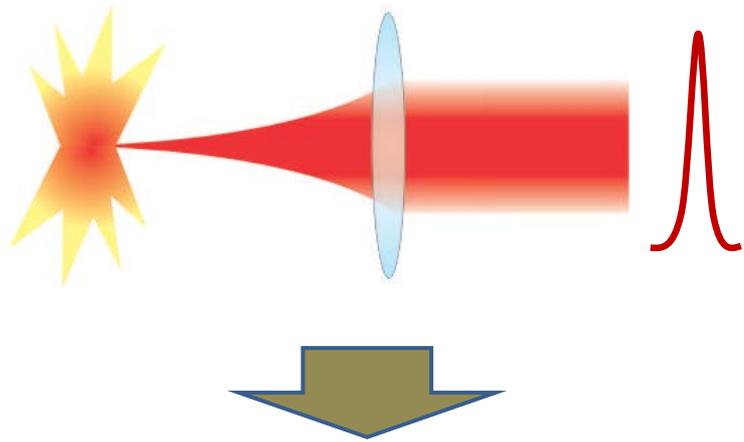




Спасибо за внимание



Увеличение яркости источника: варьирование параметров взаимодействия



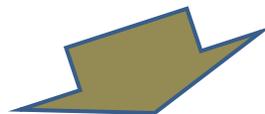
**Новый источник
заряженных частиц и
рентгеновского
излучения**

**Релятивистская
лазерная плазма (РЛП)**



Характеристики РЛП

- Твердотельная плотность: $n_e > 10^{22} \text{ см}^{-3}$
- Малый размер: $d \sim d_{laser\ focus} (\sim 10\mu)$
- Существенная неравновесность:



квази-тепловые электроны:

$$E_e = \text{до } 1 \text{ кэВ}$$

(обратнотормозное поглощение)

быстрые (горячие) электроны:

$$E_{hot} = \text{от } 10 \text{ кэВ до } 1 \text{ ГэВ}$$

(ускорение лазерным полем)

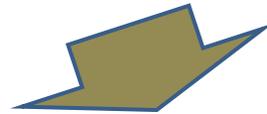
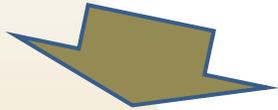
- Малое время жизни : **несколько пикосекунд**
- Спектр свечения в рентгеновском диапазоне:

$$W(T_{hot}, E_{x-ray}) \sim \exp(-E_{x-ray}/T_{hot})$$



Характеристики РЛП

- Твердотельная плотность: $n_e > 10^{22} \text{ см}^{-3}$
- Малый размер: $d \sim d_{laser\ focus} (\sim 10 \mu)$
- Существенная неравновесность:



Применения:

- Рентгеновская спектроскопия высокого временного разрешения;
- Дифракционный анализ;
- Напыление плёнок;
- Инициирование ядерных реакций в плазме;
- Ионная терапия опухолей и т.д.



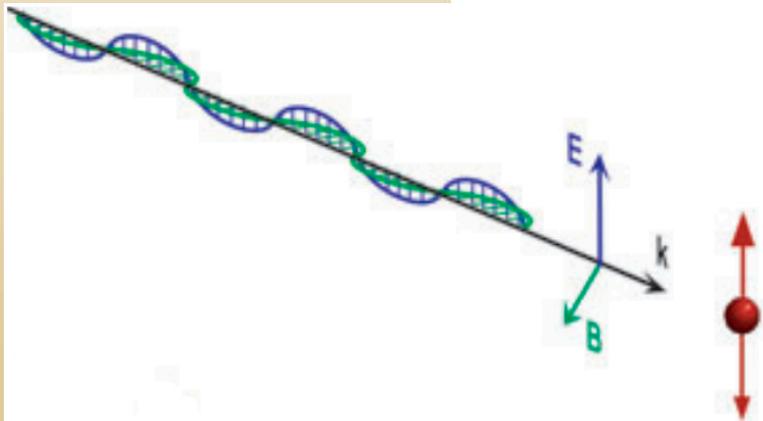
Основные механизмы лазерного ускорения электронов

Умеренные интенсивности:

от 10^{15} до 10^{18} Вт/см²

- резонансное поглощение
- вакуумный нагрев
- аномальный скин-эффект

$E_{hot} = \text{от } 1 \text{ до } 100 \text{ кэВ}$

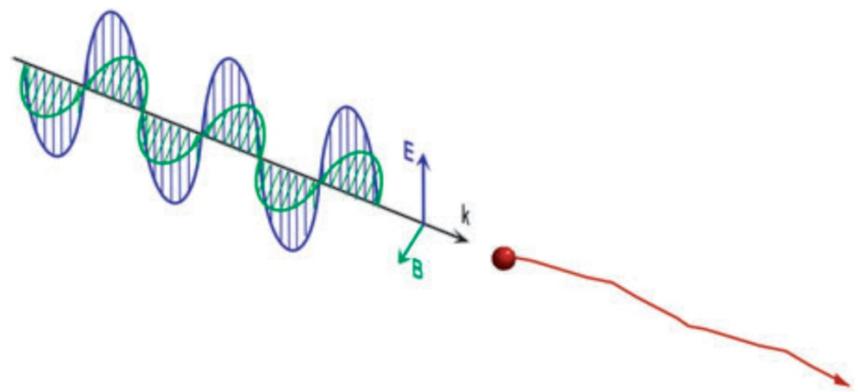


Релятивистские интенсивности:

от 10^{18} Вт/см²

- $j \times B$ нагрев
- пондеромоторное действие света
- ускорение в кильватерной волне

$E_{hot} = \text{от } 100 \text{ кэВ до } 1 \text{ ГэВ}$





Структура доклада

- **Лазерная плазма:**
 - введение
 - свойства плазмы
 - механизмы ускорения электронов
- **Экспериментальные результаты**
- **Ядерные приложения:**
 - диагностика плазмы
 - применение к ядерным задачам
- **Заключение**



Экспериментальные результаты: схема установки

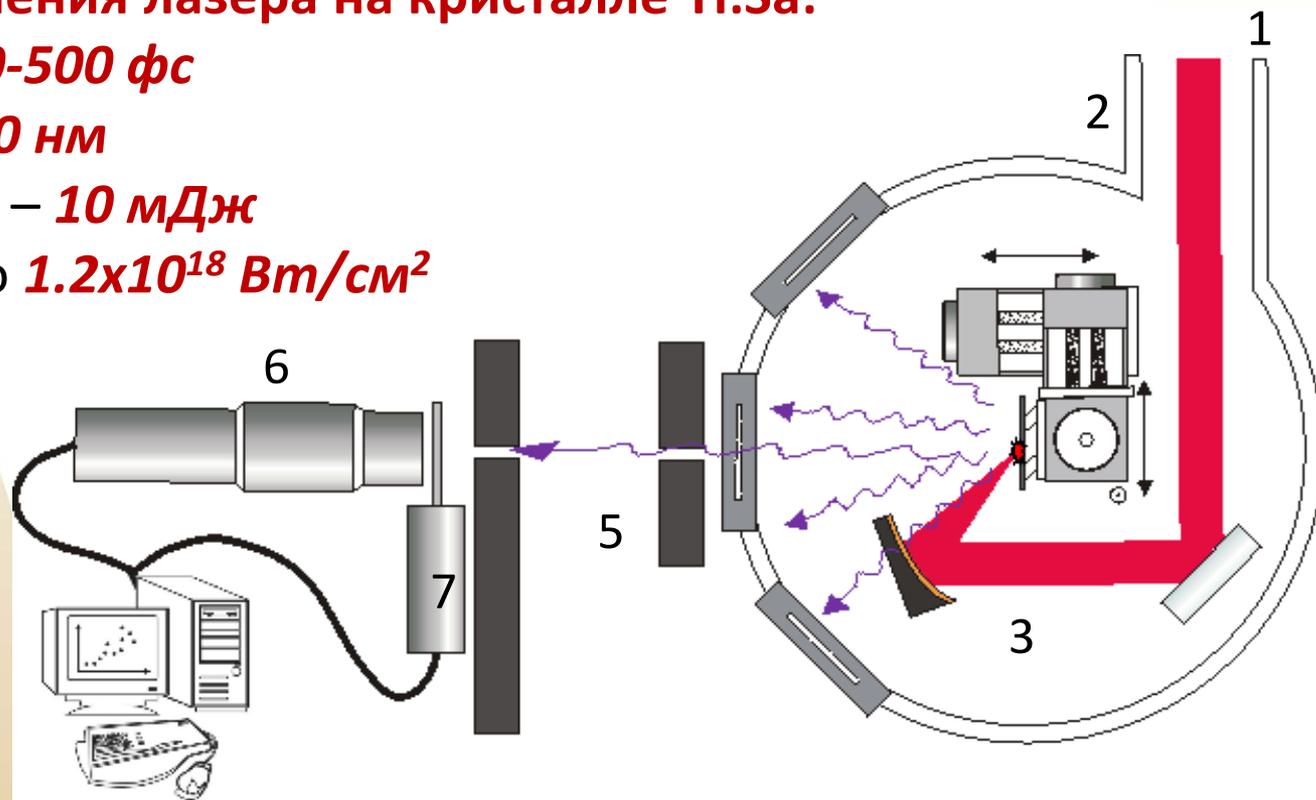
Параметры излучения лазера на кристалле Ti:Sa:

длительность – **50-500 фс**

длина волны – **800 нм**

энергия импульса – **10 мДж**

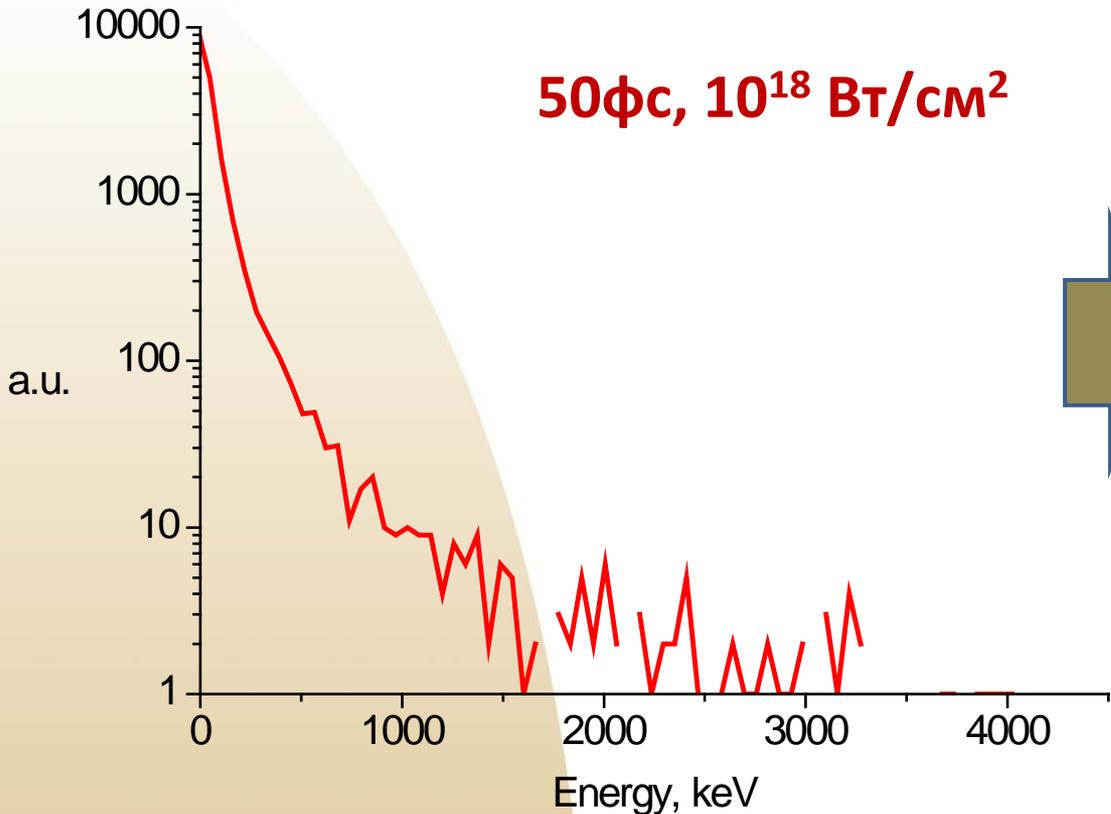
интенсивность: до **1.2×10^{18} Вт/см²**



1 – лазерный импульс, 2 – вакуумная камера ($P_{\text{осм}} = 10^{-2}$ торр), 3 – внеосевое параболическое зеркало, 4 – железная мишень, 5 – свинцовые диафрагмы, 6 – ФЭУ с сцинтиллятором NaI(Tl), 7 – ФЭУ с пластиковым сцинтиллятором



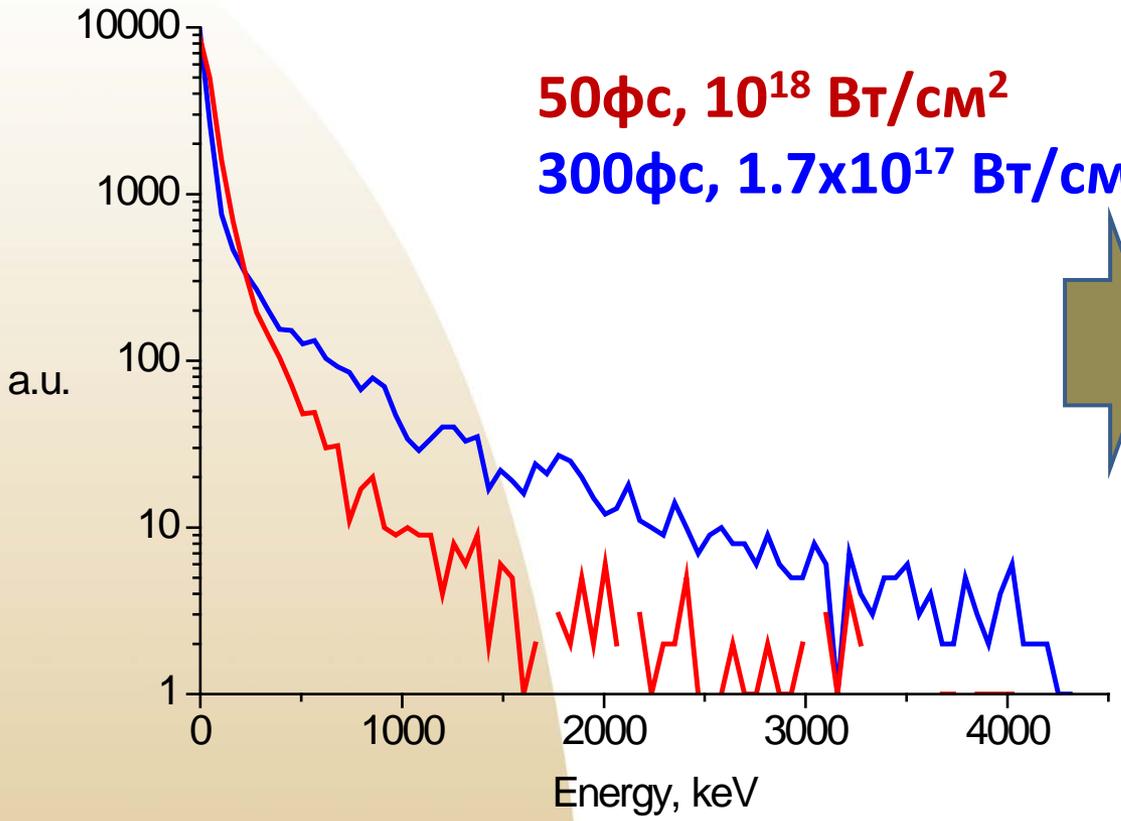
Экспериментальные результаты: рентгеновские спектры



$Max E_{x-ray} > 2 \text{ МэВ}$
 $E_{hot} > 200 \text{ кэВ}$



Экспериментальные результаты: рентгеновские спектры

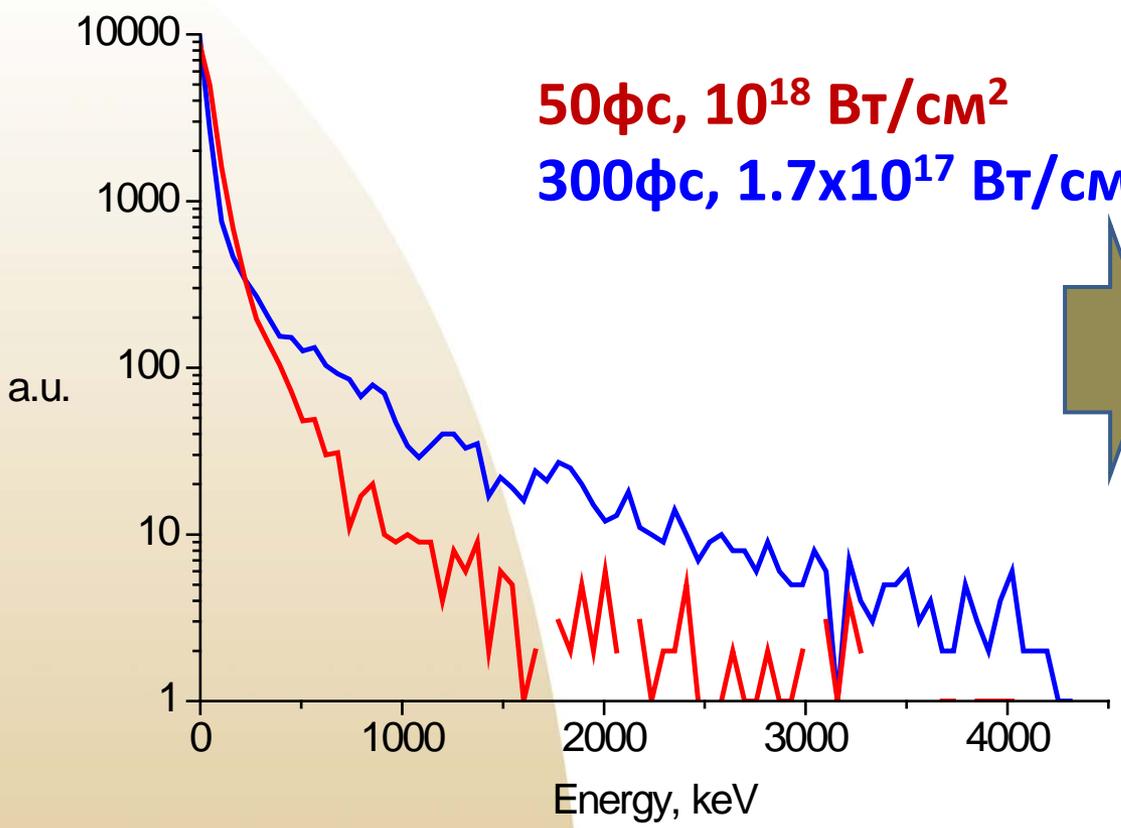


$Max E_{x-ray} > 2$ МэВ
 $E_{hot} > 200$ кэВ

$Max E_{x-ray} > 3,5$ МэВ
 $E_{hot} > 400$ кэВ



Экспериментальные результаты: рентгеновские спектры



$Max E_{x-ray} > 2$ МэВ
 $E_{hot} > 200$ кэВ

$Max E_{x-ray} > 3,5$ МэВ
 $E_{hot} > 400$ кэВ

➔ **Более эффективное ускорение электронов в поле «длинного» импульса:
? более протяженное плазменное облако – бóльшая ускоряющая длина?**

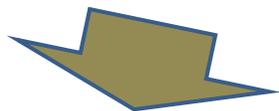


Структура доклада

- **Лазерная плазма:**
 - введение
 - свойства плазмы
 - механизмы ускорения электронов
- **Экспериментальные результаты**
- **Ядерные приложения:**
 - диагностика плазмы
 - применение к ядерным задачам
- **Заключение**

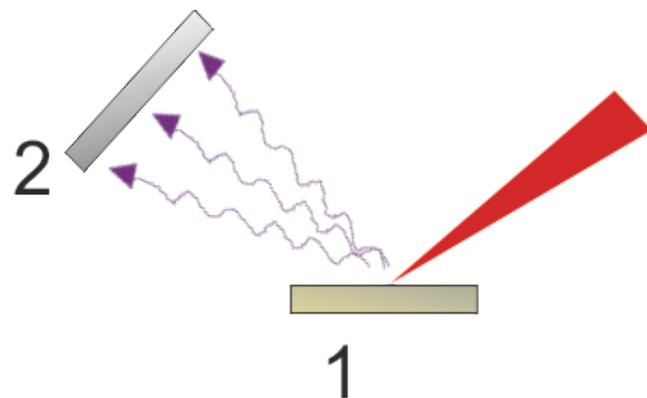


Применения к ядерным задачам



Диагностика плазмы:

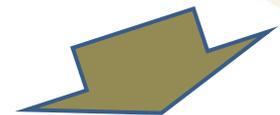
**оценка параметров плазмы
по выходу продуктов
реакции [1] :**



[1] Матафонов А.П., 2009



Применения к ядерным задачам



Диагностика плазмы:

оценка параметров плазмы по выходу продуктов реакции [1]:

$${}^9\text{Be}(g;n)2\alpha, E_{\text{порог}} = 1.57\text{МэВ}$$

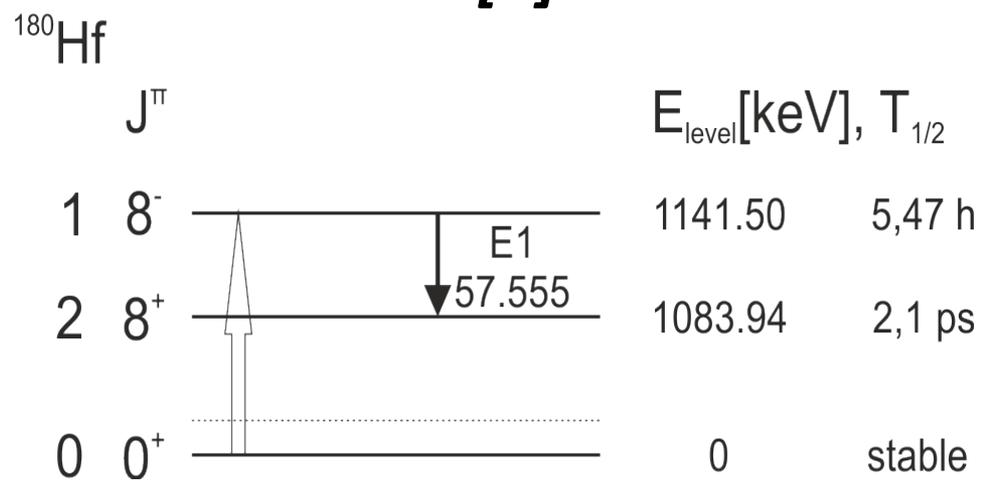
$${}^{181}\text{Ta}(g;n){}^{180}\text{Ta}, E_{\text{порог}} = 7.56\text{МэВ}$$

$${}^{63}\text{Cu}(g;n){}^{62}\text{Cu}, E_{\text{порог}} = 9.8\text{МэВ}$$

Инициирование реакций

- накачка

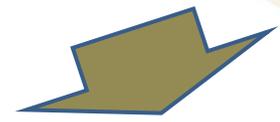
«короткоживущих» состояний [2]:



[2] Шуляпов С.А., 2011



Применения к ядерным задачам



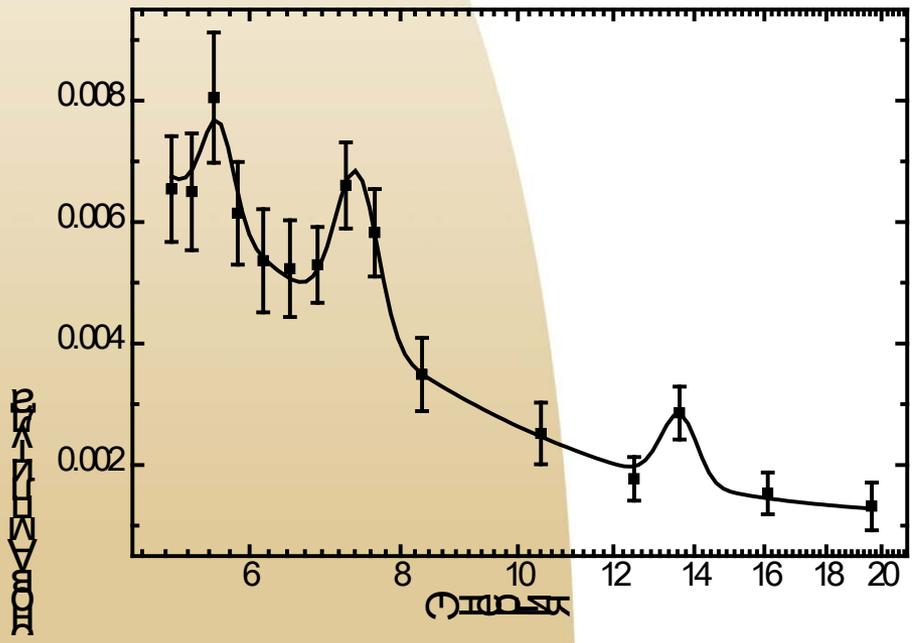
Диагностика плазмы:

оценка параметров плазмы по выходу продуктов реакции [1]:

Иницирование реакций

- накачка «короткоживущих» состояний [2]:

- возбуждение низкоэнергетических уровней:
Fe-57, 14.4 кэВ, 98 нс [3]



[3] Головин Г.В., 2011