



Пятые Черенковские Чтения

Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц

Новые фотоядерные методы на основе фемтосекундных лазеров

Иванов К.А., Шуляпов С.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*

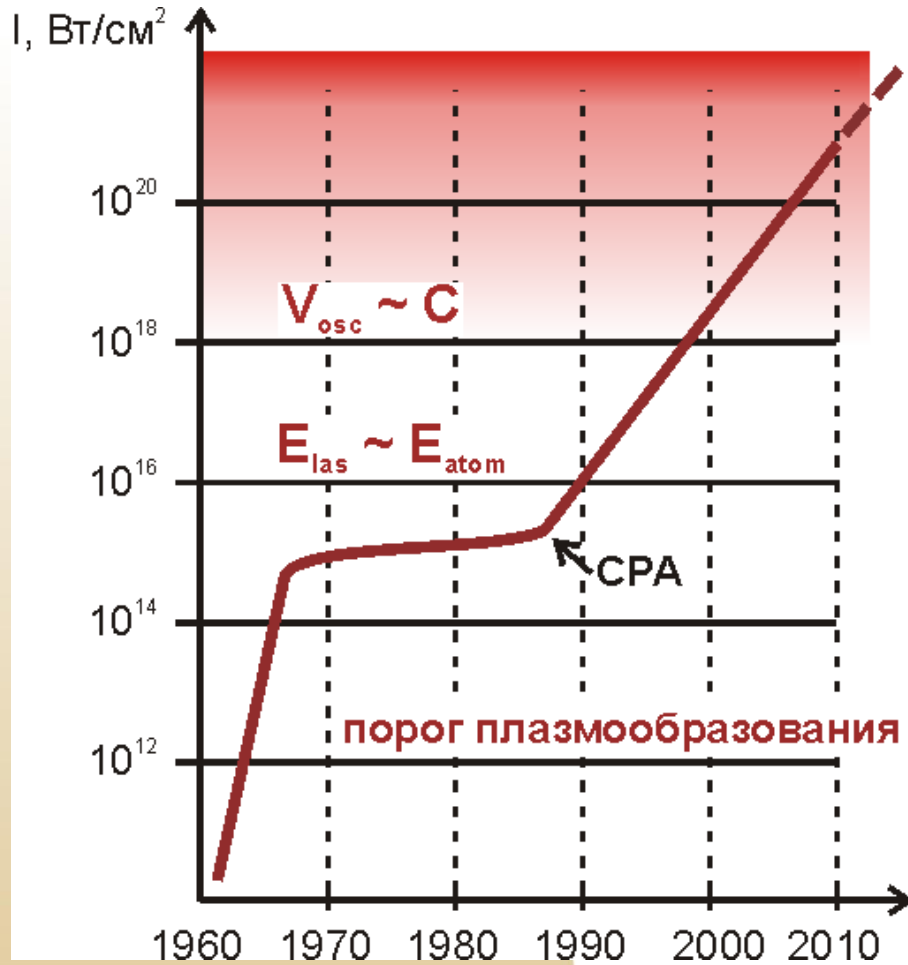


Структура доклада

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



Лазерная плазма



Современные лазеры:

Длительность импульса:

10-1000 фс

Энергия импульса:

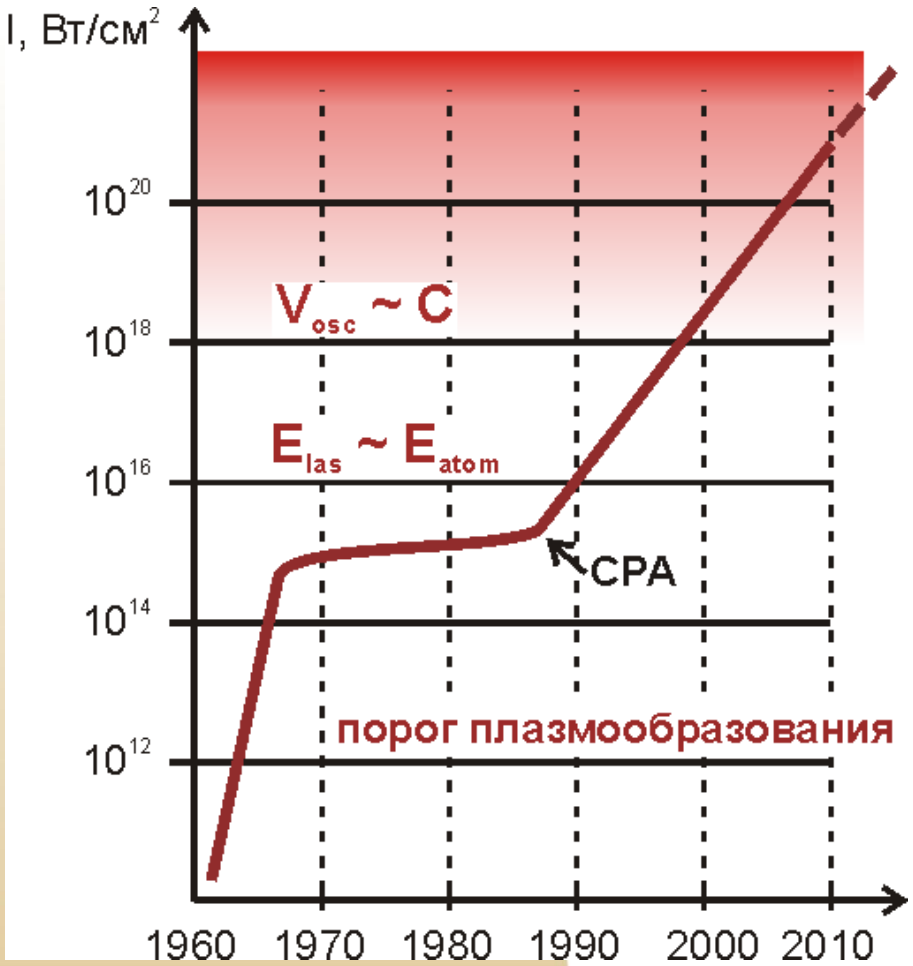
0.1-1000 мДж

Пиковая интенсивность:

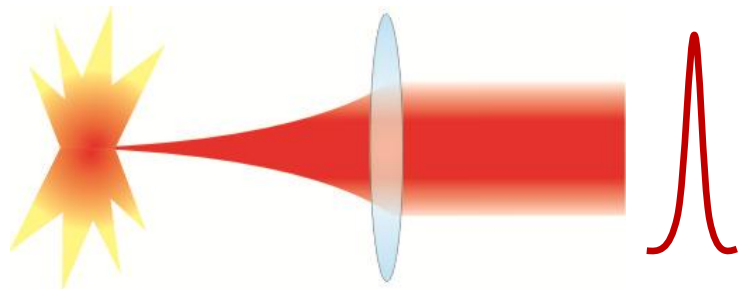
до 10^{21} Вт/см²



Лазерная плазма



Релятивистская лазерная плазма (РЛП)

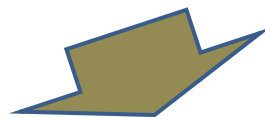
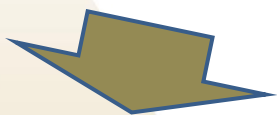


**Новый источник
заряженных частиц и
рентгеновского
излучения**



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)

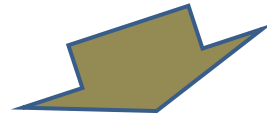
- Малое время жизни : *несколько пикосекунд*
- Спектр свечения в рентгеновском диапазоне:

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



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

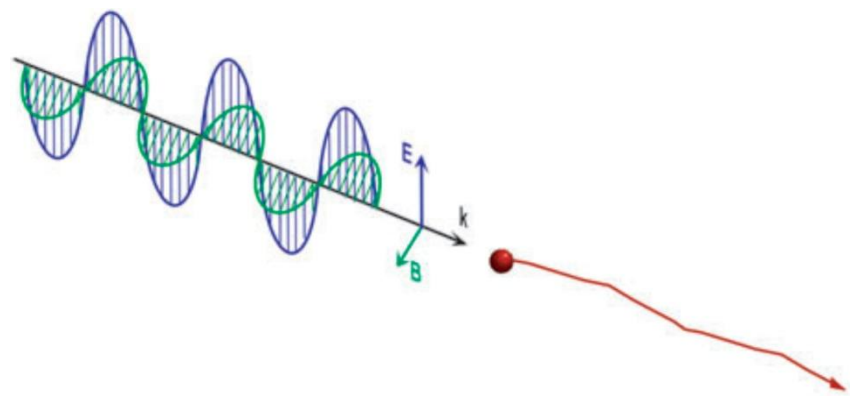
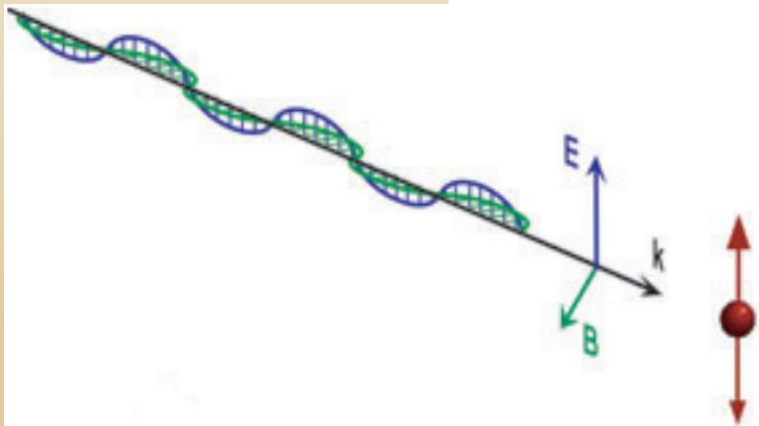
$E_{hot} = \text{от } 1 \text{ до } 100 \text{ кэВ}$

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

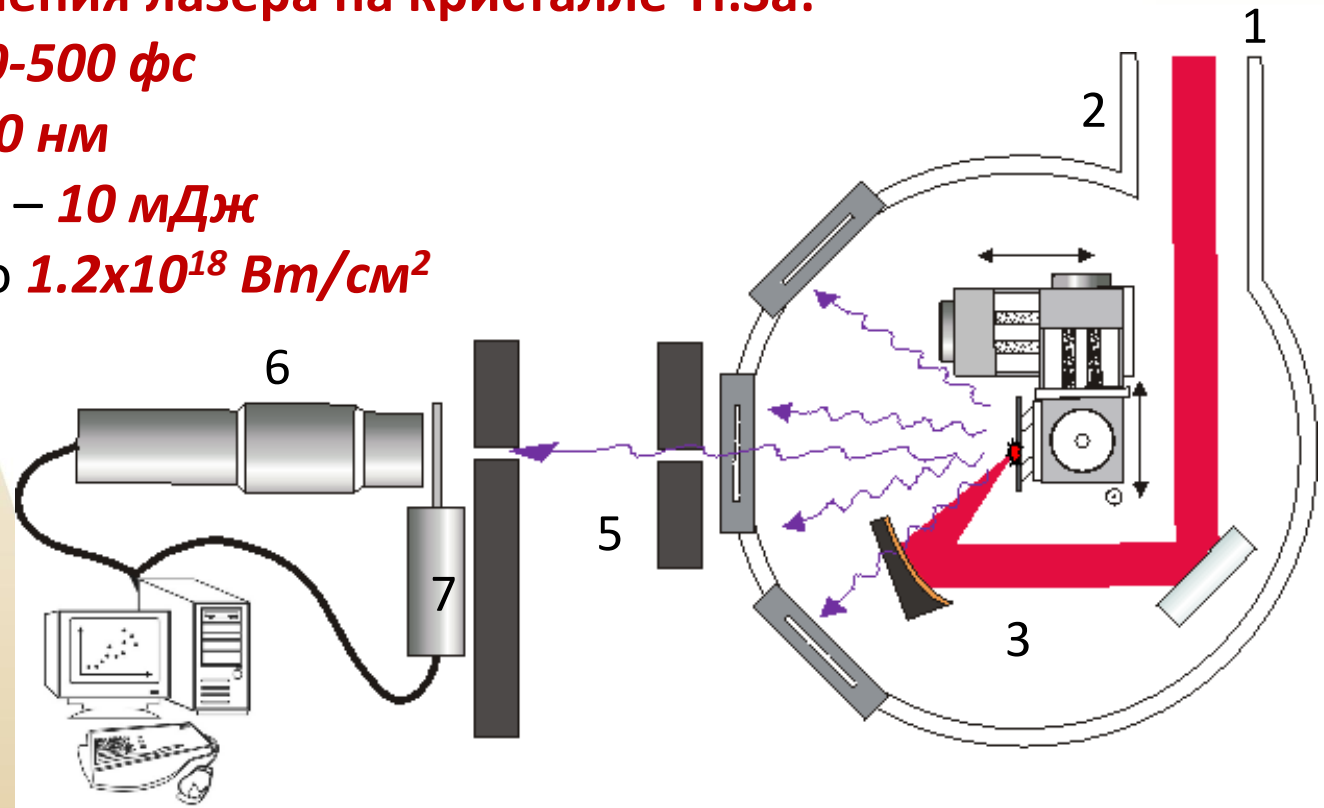
Параметры излучения лазера на кристалле Ti:Sa:

длительность – **50-500 фс**

длина волны – **800 нм**

энергия импульса – **10 мДж**

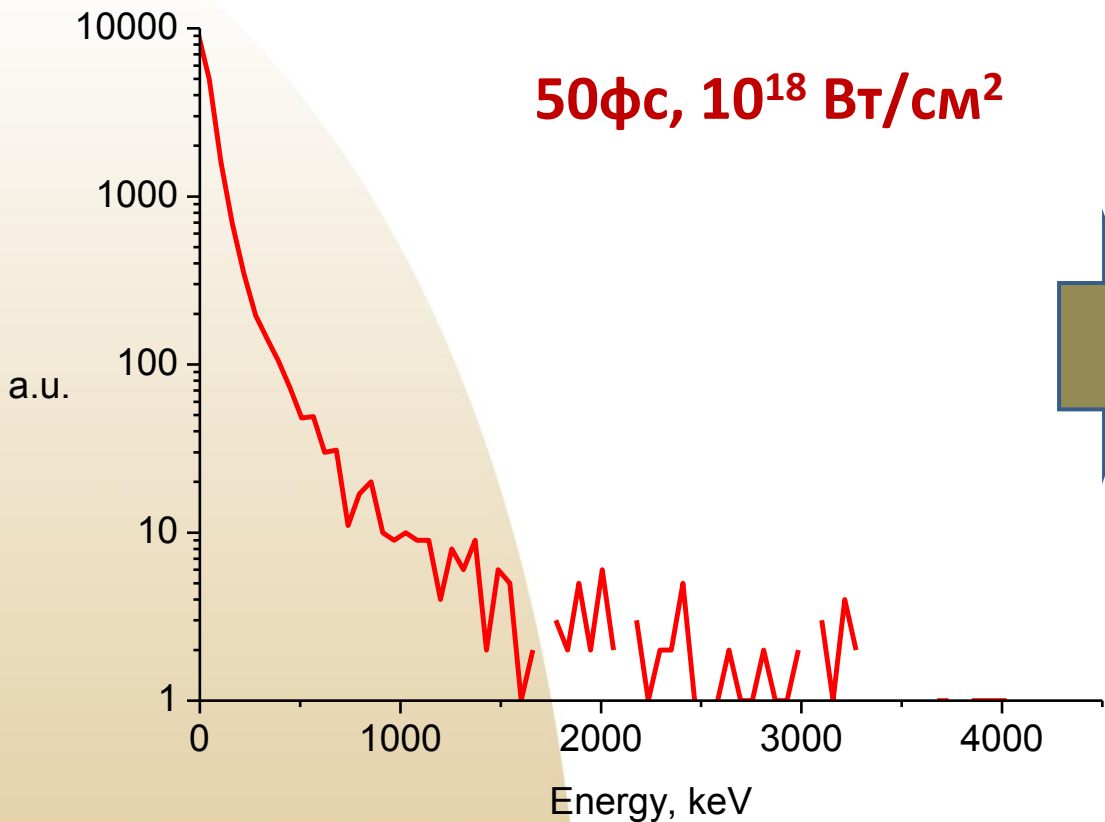
интенсивность: до **1.2×10^{18} Вт/см²**



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



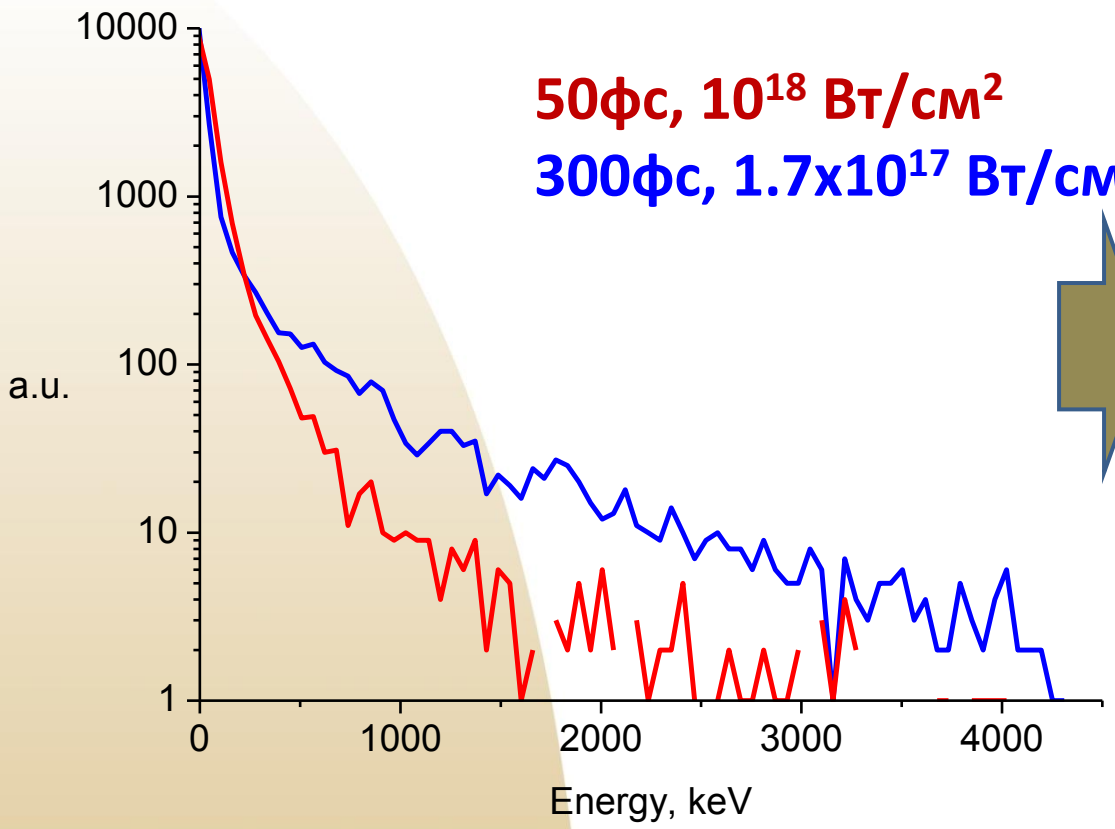
50 фс, 10^{18} Вт/см²



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



Экспериментальные результаты: рентгеновские спектры

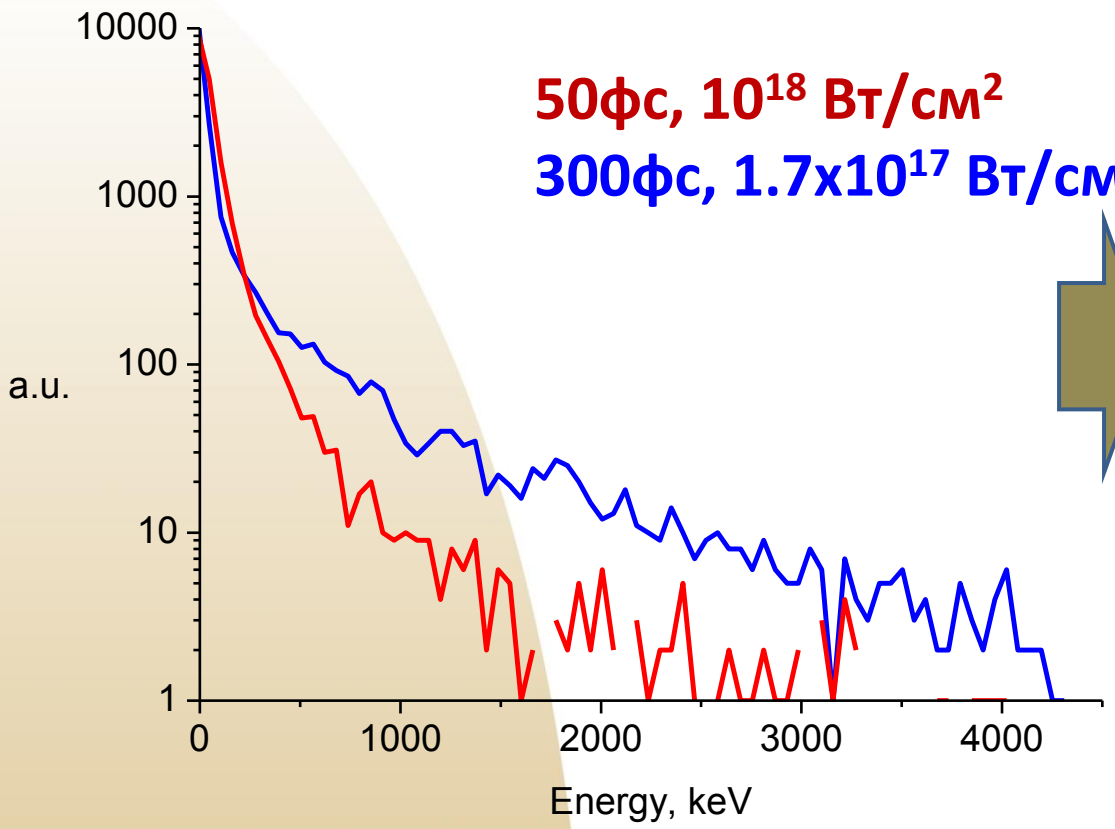


$Max E_{x-ray} > 2$ МэВ
 $E_{hot} > 200$ кэВ

$Max E_{x-ray} > 3,5$ 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?**

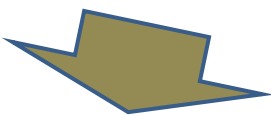


Структура доклада

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

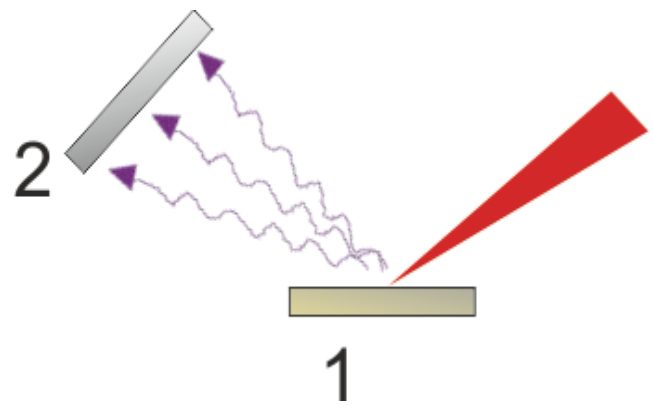
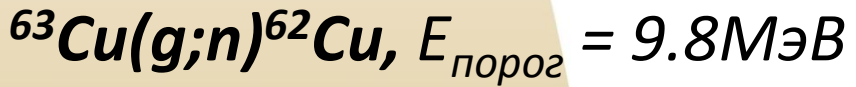
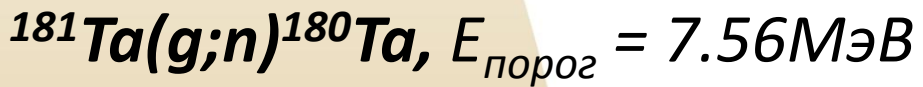
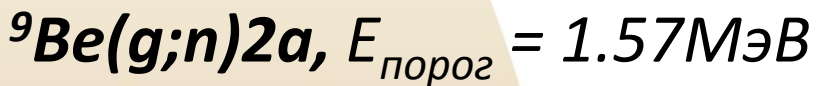


Применения к ядерным задачам



Диагностика плазмы:

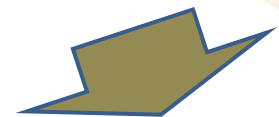
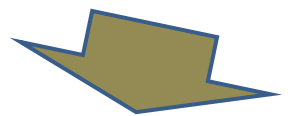
оценка параметров плазмы
по выходу продуктов
реакции [1]:



[1] Матафонов А.П., 2009



Применения к ядерным задачам



Диагностика плазмы:

оценка параметров плазмы по выходу продуктов реакции [1]:

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

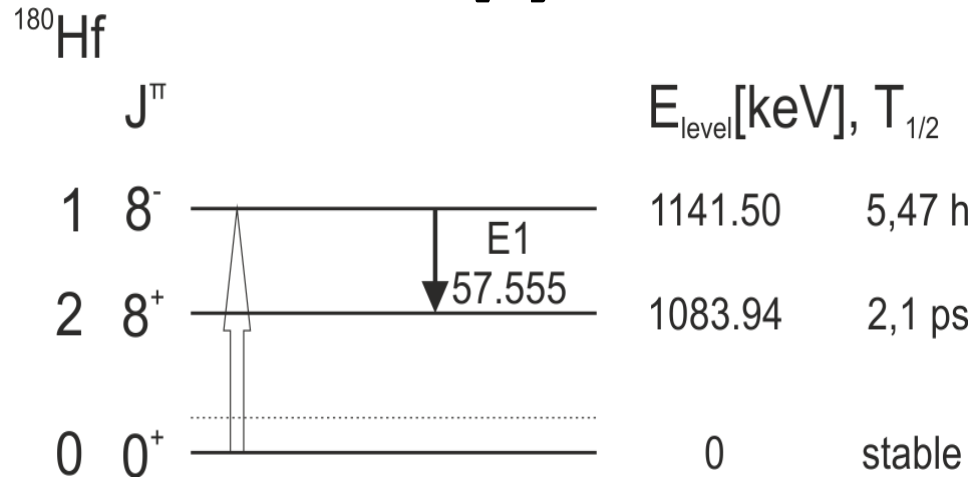
$${}^{181}\text{Ta}(g;n){}^{180}\text{Ta}, E_{\text{порог}} = 7.56\text{МэВ}$$

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

Инициирование реакций

- накачка

«короткоживущих» состояний [2]:



[2] Шуляпов С.А., 2011



Применения к ядерным задачам

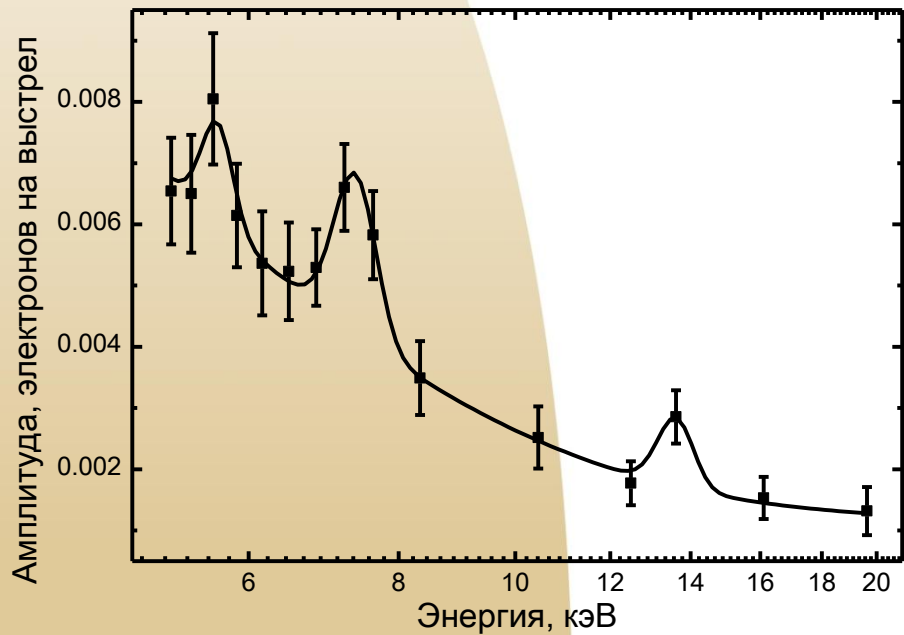


Диагностика плазмы:

оценка параметров плазмы по выходу продуктов реакции [1]:

Инициирование реакций

- накачка «короткоживущих» состояний [2]:



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

[3] Головин Г.В., 2011



Заключение

- Релятивистская лазерная плазма – уникальный источник быстрых заряженных частиц (электронов и ионов) и гамма-излучения с заданными характеристиками;
- Изменение параметров взаимодействия излучения с веществом позволяет легко управлять свойствами лазерной плазмы;
- РЛП может использоваться для возбуждения короткоживущих и низкоэнергетических ядерных состояний.



Спасибо за внимание