



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# Использование лазер- плазменных ускорителей в РФЯЦ-ВНИИТФ

«Школа по физике высоких плотностей энергии», 26.02-01.03 2024 г.

**Говрас Евгений Александрович**

старший научный сотрудник НТО-1, к.ф.-м.н.

**А.В. Павленко, А.Г. Какшин, коллектив отдела 53 НИО-5**

2005 г. – закончил школу № 125 (Снежинск)

с 2008 г. – работа по лазер-плазменному взаимодействию (ФИАН, Москва)

2010 – ВНИИА им. Н.Л. Духова (Москва)

2011 – закончил МИФИ (каф. №32) с красным дипломом

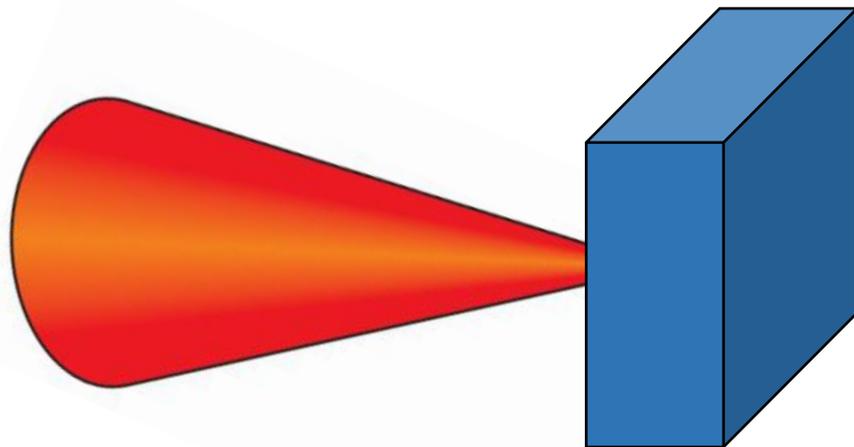
2016 – защитил кандидатскую диссертацию (ФИАН)

с 2019 – РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск)

Исполнитель и руководитель грантов РФФИ и РНФ

13 статей по Web of Science

# Лазер-плазменное взаимодействие



## Лазерный импульс

энергия –  $\epsilon_L$ : 1 Дж – 2 МДж

длина волны –  $\lambda$ : 0.1 мкм – 10 мкм

длительность –  $\tau$ : 10 фс – 10 нс

пятно фокусировки –  $D_f$ : 1 мкм – 1 мм

интенсивность –  $I$ :  $10^{12}$  –  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>

## Мишень

размер –  $L$ : 3 нм – 1 мм

плотность –  $n$ :  $10^{17}$  –  $10^{23}$  см<sup>-3</sup>

состав: ...

Сейчас:

1. Сокол-Ф: 800 нм, 5 Дж, 25 фс = 200 ТВт
2. Сокол-П: 1 мкм, 100 Дж, до 500 фс = 200 ТВт
3. Сокол-З: 1 мкм, до 2 кДж, 1 нс = 2 ТВт

} синхронизованы

В перспективе:

1. Общая мишенная камера
2. Многопучковый Сокол-П
3. Нарращивание энергетики Сокол-З

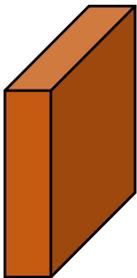
**В России подобных центров нет!**

За рубежом – счётное количество

# Лазерные мишени

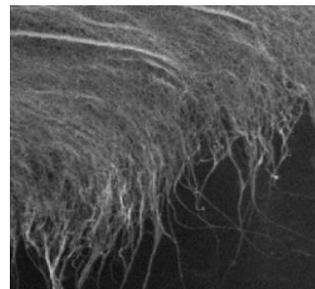
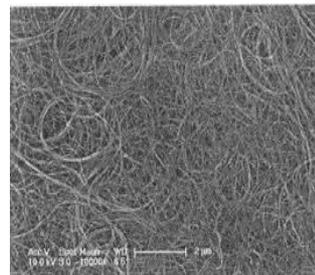
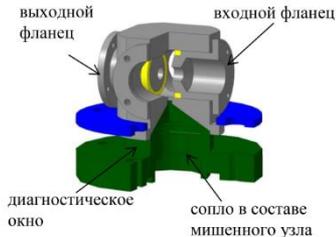
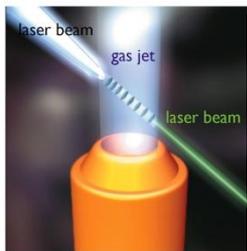
## Фольга

CH, DLC, Au, Ti, ...

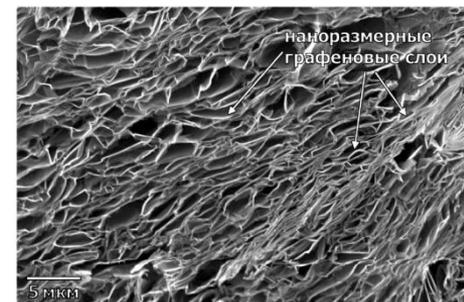


## Газ

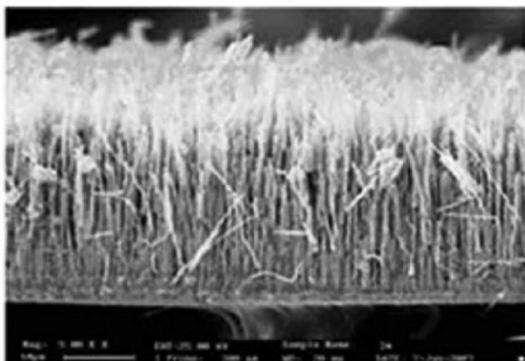
H<sub>2</sub>, He, Ar, ...



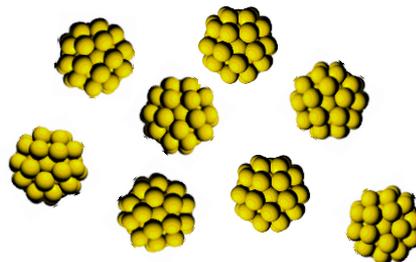
**Малоплотные**  
между ТВ.Т. и газом:  
пены, аэрогели и т.п.



## Микроструктурированные

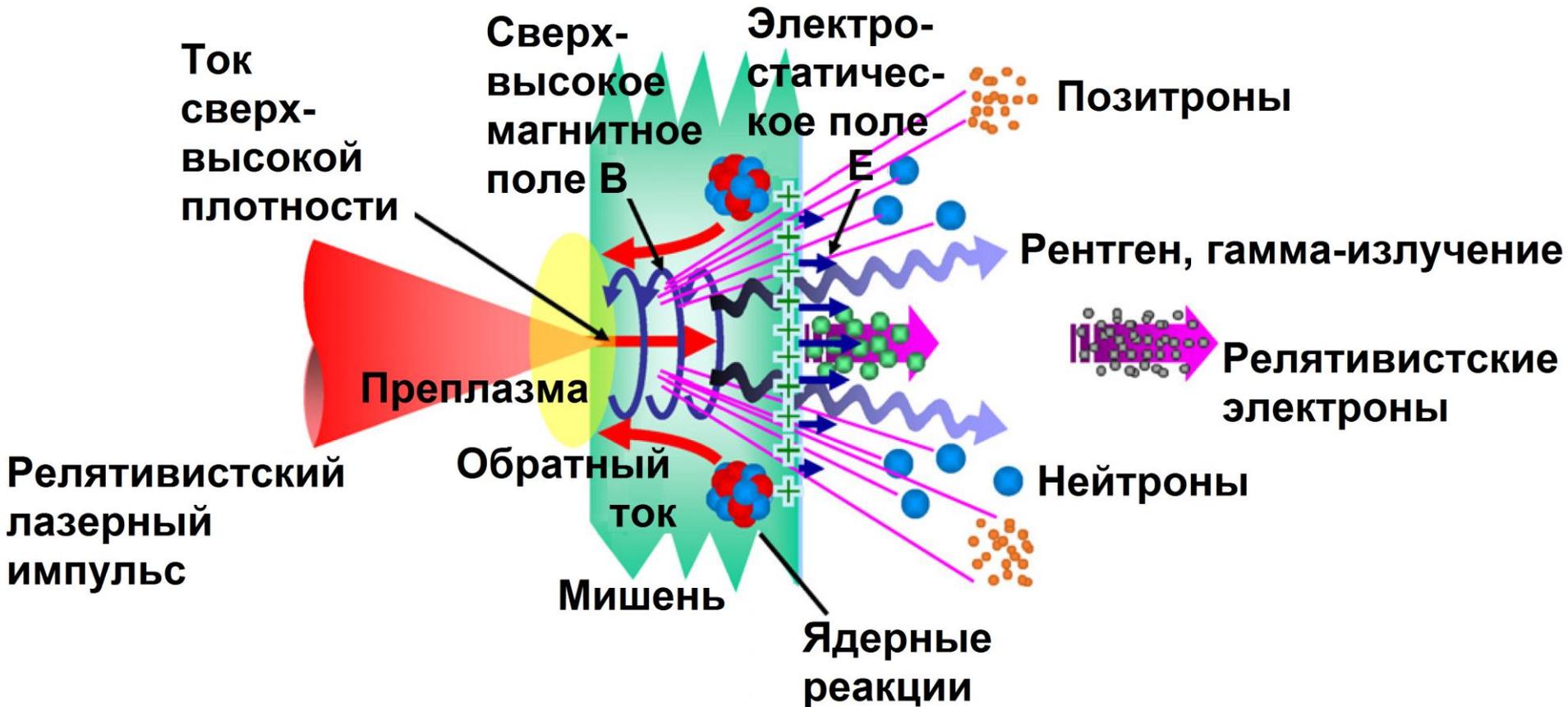


## Газ атомных кластеров



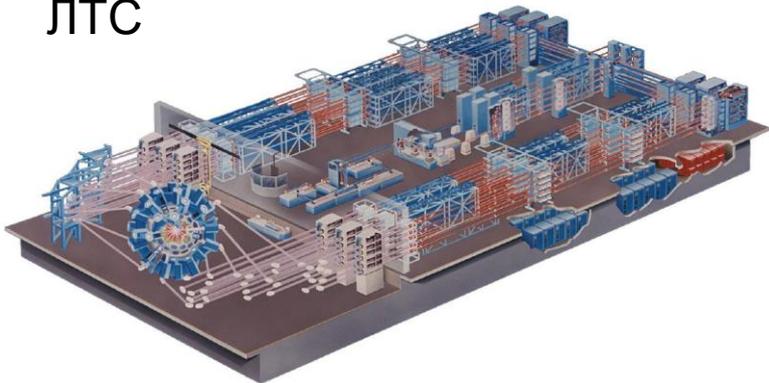
ВНИИТФ обладает всеми технологиями (замкнутое экспериментальное пространство)

# Лазер-плазменное взаимодействие

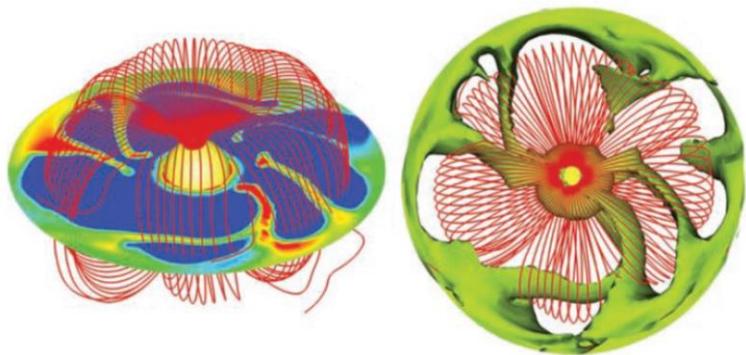


# Спектр применений

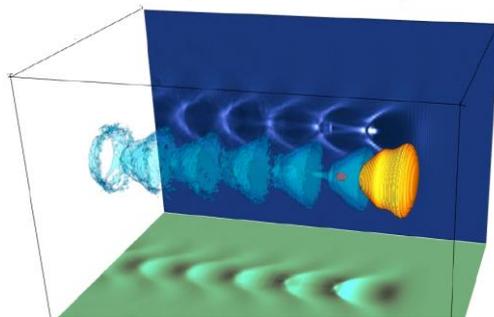
ЛТС



Астрофизика  
«на столе»



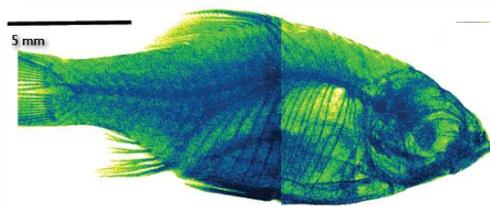
Компактные  
ускорители



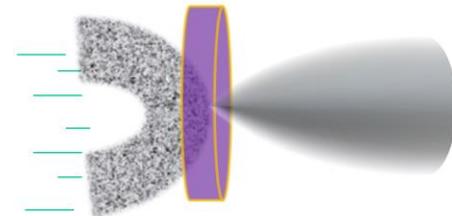
Адронная терапия



Вторичное  
излучение



Ядерная физика,  
нейтронный источник



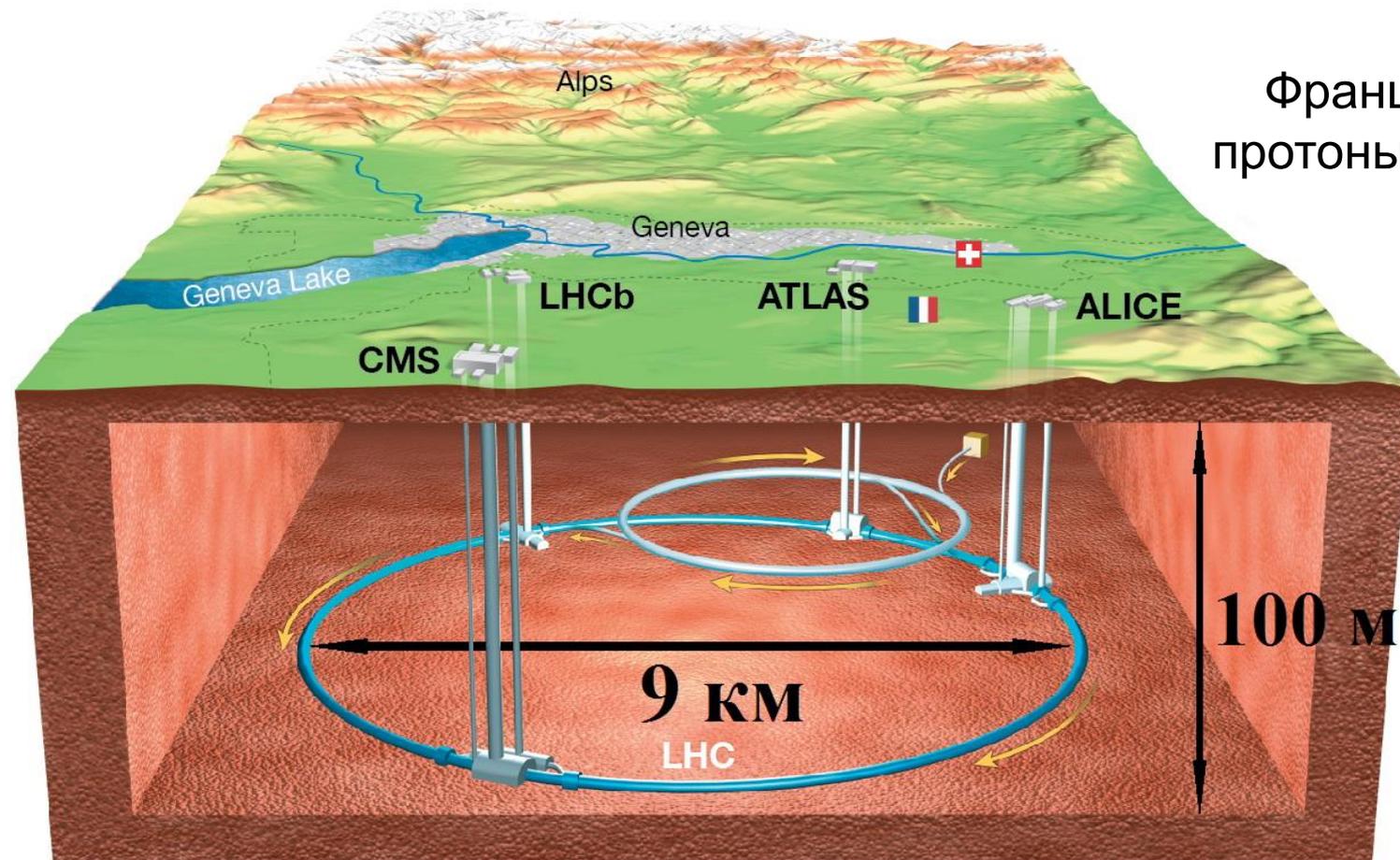
# SPRING-8



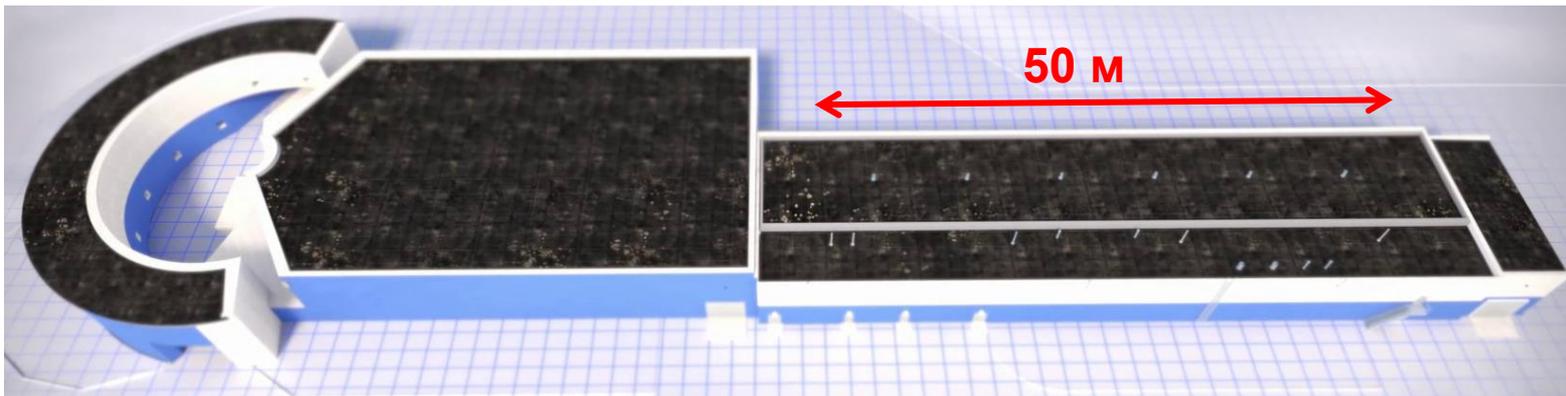
Япония  
электроны 8 ГэВ  
 $D = 460$  м

# Большой Агромный Коллайдер

Франция, Швейцария  
протоны 7 ТэВ ( $10^{12}$  эВ)  
D = 9 км



# Линейные ускорители



**КИТ**  
 $e^-$ , 20 МэВ  
 $L = 50$  м

**Stanford Linear Accelerator Center, США,  $e^-$  50 ГэВ,  $L = 3.2$  км (2 мили)**



# Темпы ускорения

**Классические ускорители:** поле пробоя вакуума 10 – 100 **МВ/м**

предельный темп ускорения  $e^-$ : **100** МэВ/м

Реально:

- SLAC – **15.6** МэВ/м (50 ГэВ, 3.2 км)
- SPring – **5.8** МэВ/м (8 ГэВ, D = 460 м)
- КИТ – **0.4** МэВ/м (20 МэВ, 50 м)

**Вакуум → Плазма!**

$$E_{cr} [\text{В/м}] \simeq 96 \sqrt{n_e [\text{см}^{-3}]}$$

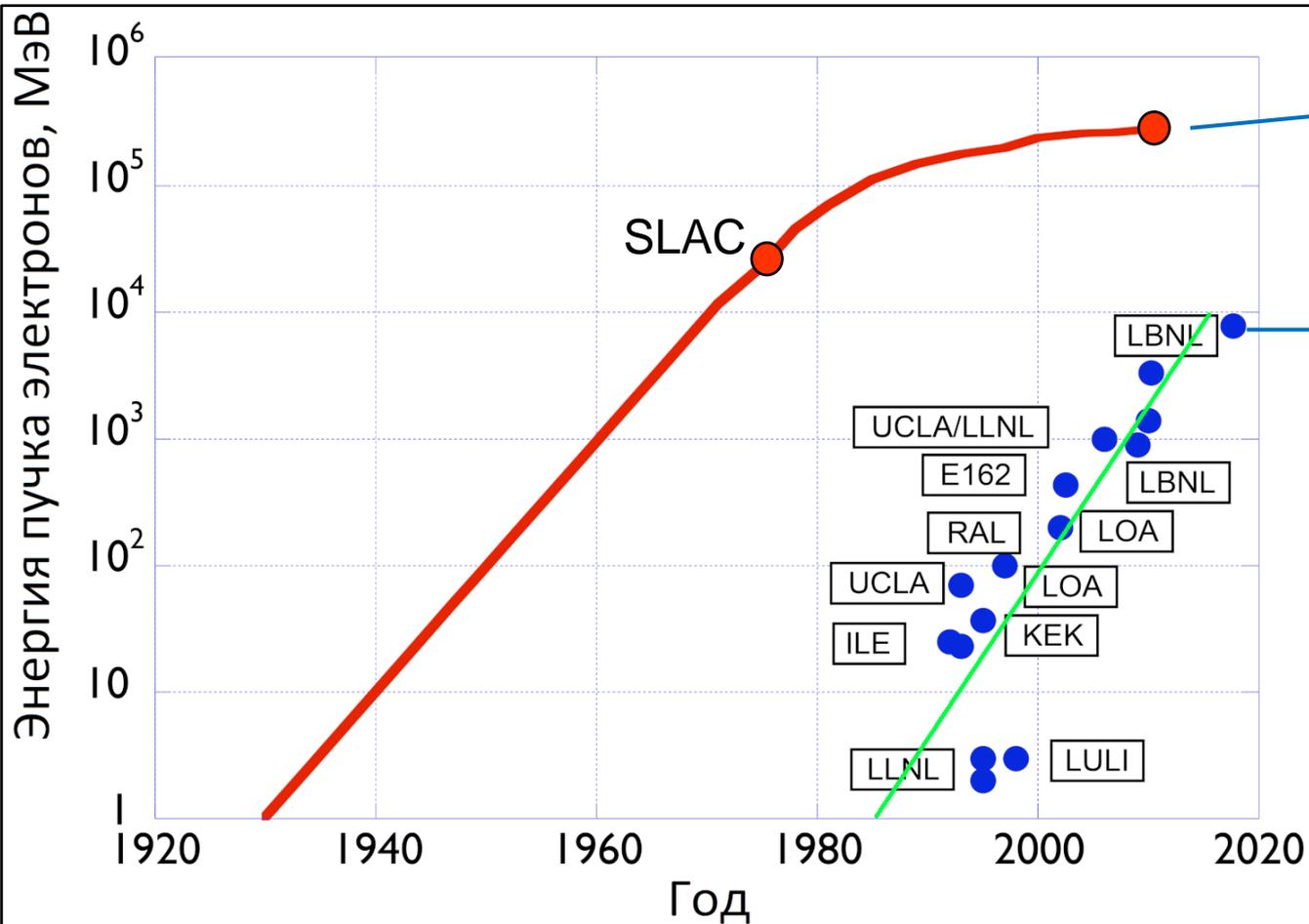
$$E_{cr} = 96 \text{ ГВ/м}$$

плотность  $10^{18} \text{ см}^{-3}$   
(газовая плазма)

2019 г.  
7.8 ГэВ  
20 см  
39 ГэВ/м

**Лазер:** создаёт плазму и генерирует ускоряющее поле

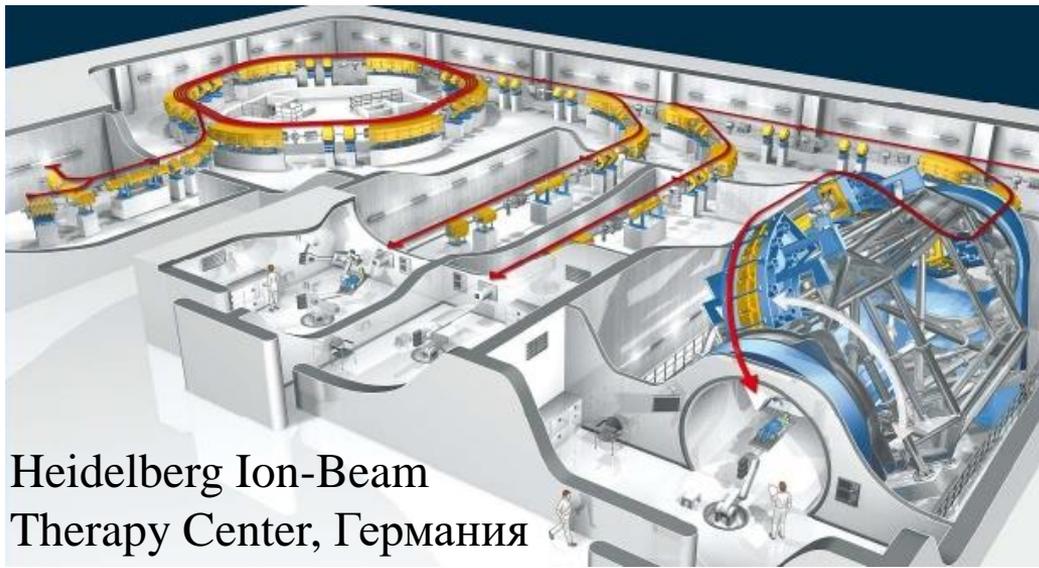
# Рост максимальной энергии



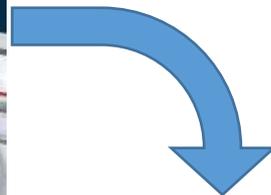
Международный  
линейный коллайдер  
(проект)  
12 км, 500 ГэВ

2019 г.  
7.8 ГэВ [1]  
20 см

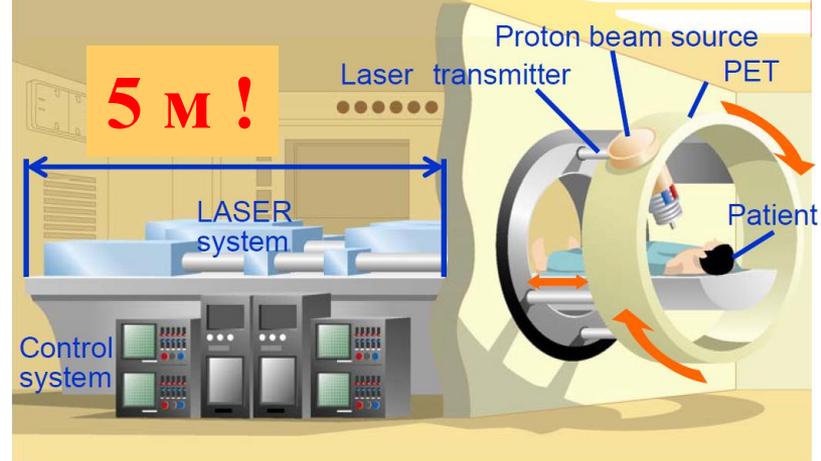
# Компактность

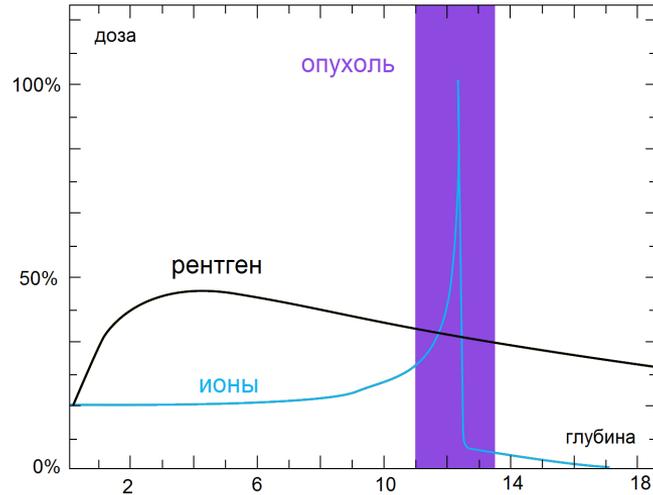
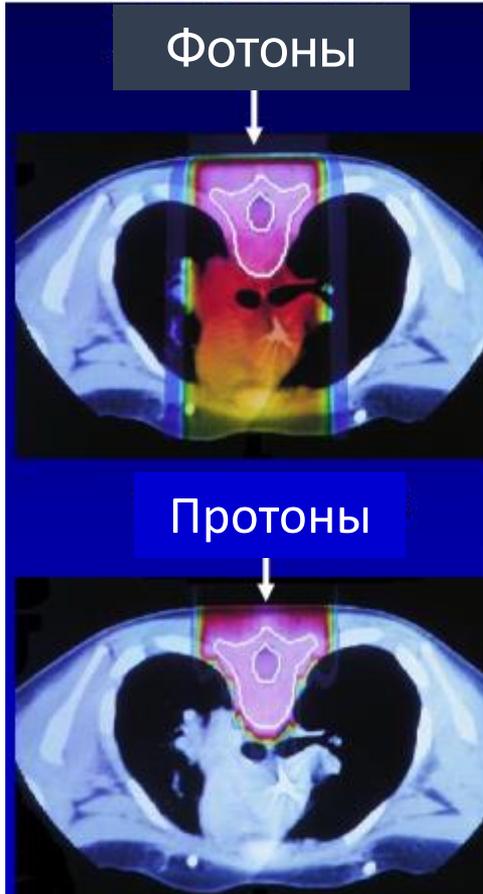


≈ 300 м



## Концепция лазерной установки



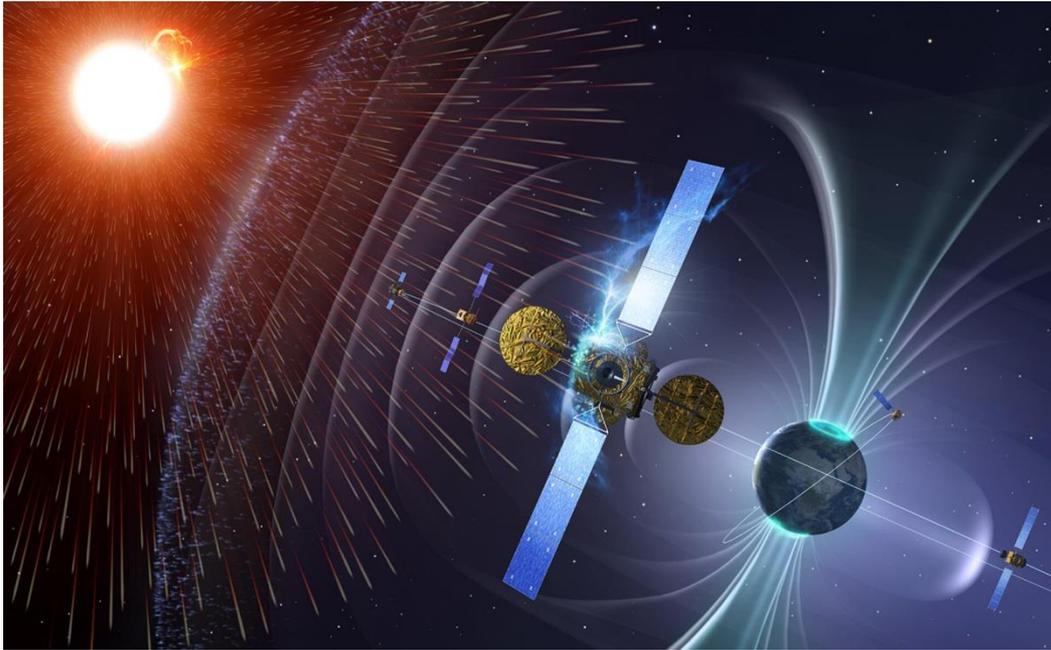


Лазер-плазменные ускорители проигрывают и по энергии, и по количеству ускоренных частиц!

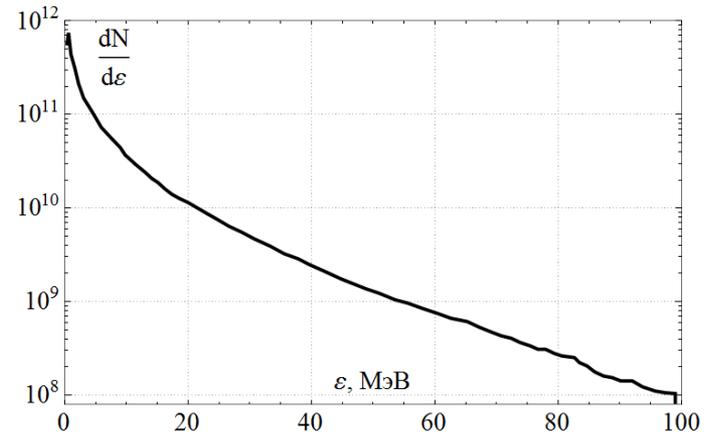
## Требования к пучку частиц

- частота повторения  $10^9 - 10^{10} \text{ с}^{-1}$
- разброс по энергиям.  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_{\text{max}} < \text{неск. \%}$   
рекорд –  $< 1\%$ ,  $\varepsilon_{\text{max}} = 22 \text{ МэВ}$
- максимальная энергия p: 200-250 МэВ    C: 300-350 МэВ/н  
рекорды: p  $\sim 100 \text{ МэВ}$ , C  $\approx 1 \text{ ГэВ}$  (90 МэВ/н)

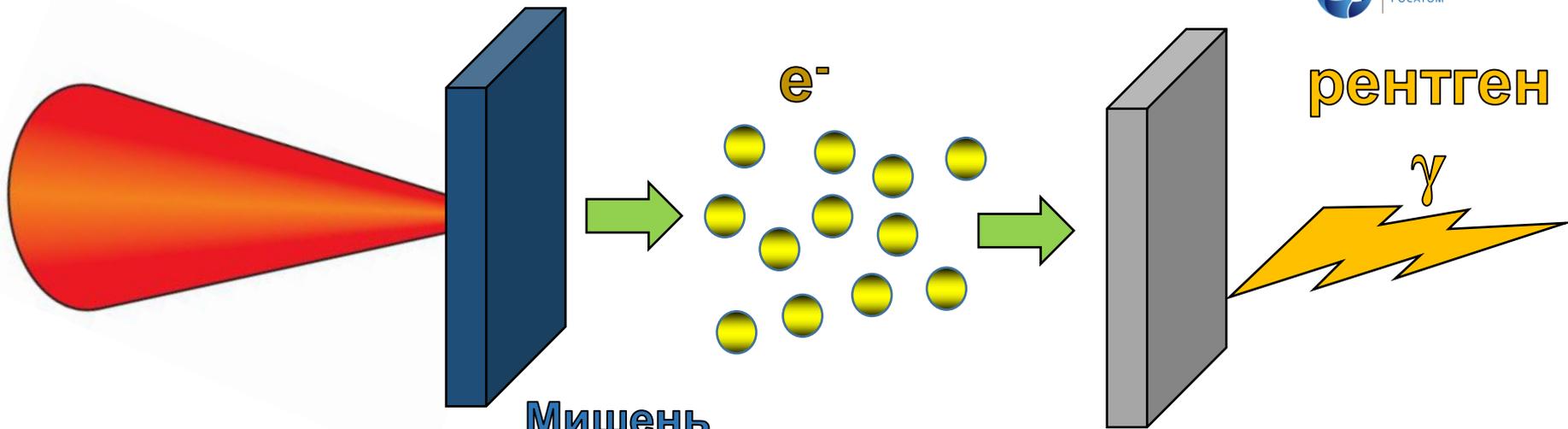
# Стойкость микросхем



1. Не нужна моноэнергетичность
2. Потoki малые
3. Смена типа частиц
4. Цена



# Лазерный источник вторичного излучения



**Мишень**

толщина, плотность,  
состав

**Конвертер**

размер –  $L$ : ~ несколько мм  
Та, W

оптимизация ускорения  
и конверсии

## Лазерный импульс

энергия –  $\epsilon_L$ : 1 Дж – 100 Дж

длина волны –  $\lambda$ : ~1 мкм

длительность –  $\tau$ : 30 фс – 1 пс

пятно фокусировки –  $D_f$ : 1 мкм – 10 мкм

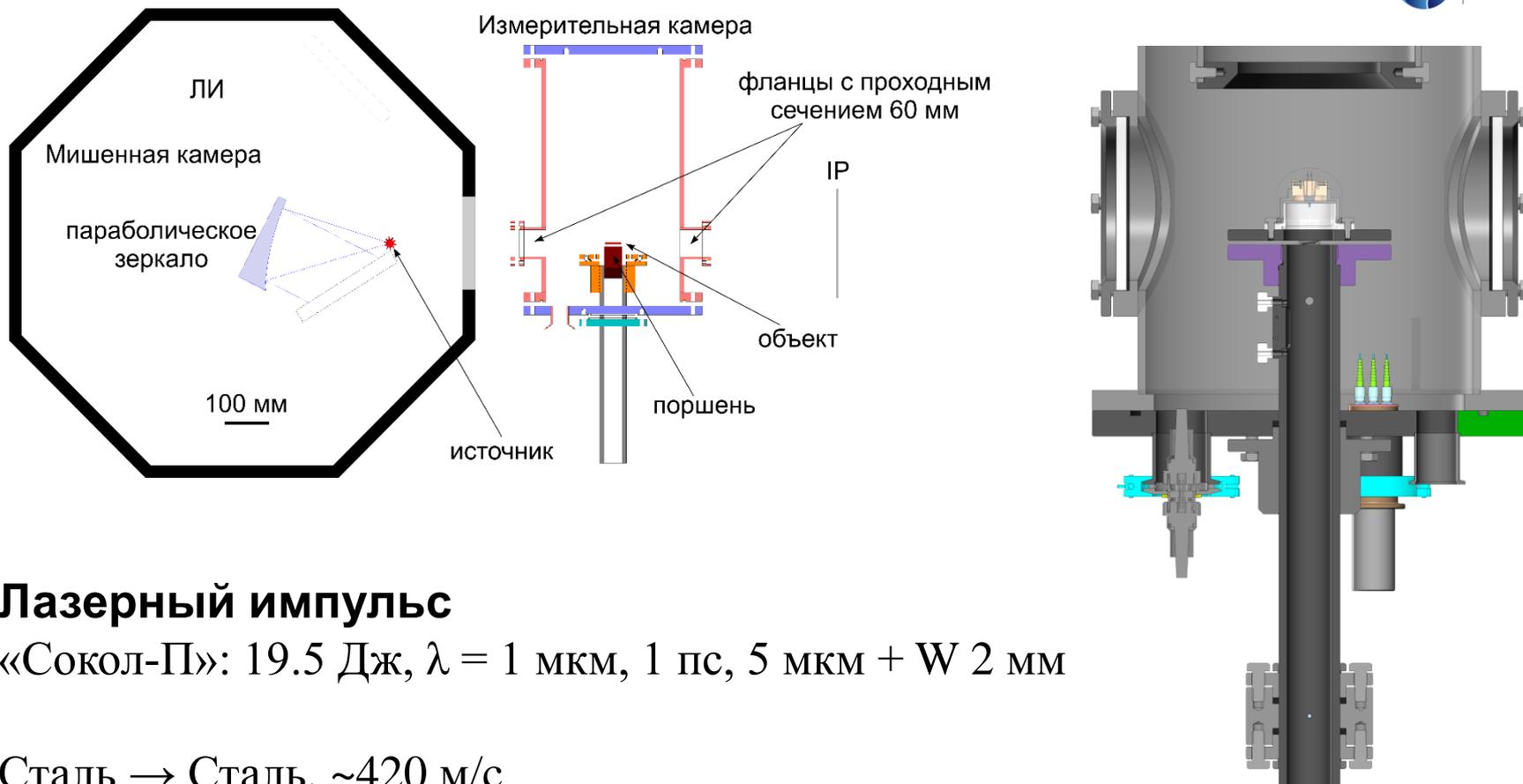
интенсивность –  $I$ :  $10^{18}$  –  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>

# Сравнение



	Лазерные	Классические
Цена	+	
Компактность	+	
Размер источника	+	
Угловая расходимость		+
Длительность импульса	+	
КПД		+
Стабильность работы		+
Число частиц		+
Многоракурсность	+	
Многокадровость ( $\min \Delta t$ )	+	

# Постановка эксперимента

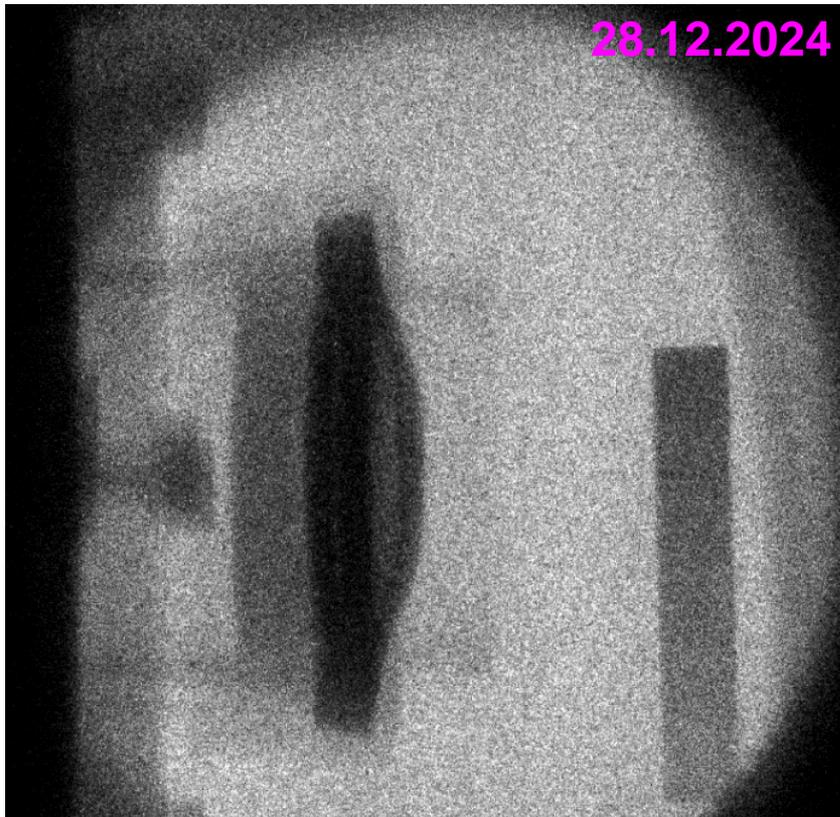


## Лазерный импульс

«Сокол-П»: 19.5 Дж,  $\lambda = 1$  мкм, 1 пс, 5 мкм + W 2 мм

Сталь → Сталь, ~420 м/с

# Результат



Впервые в России ! (точно)  
В мире – скорее всего тоже

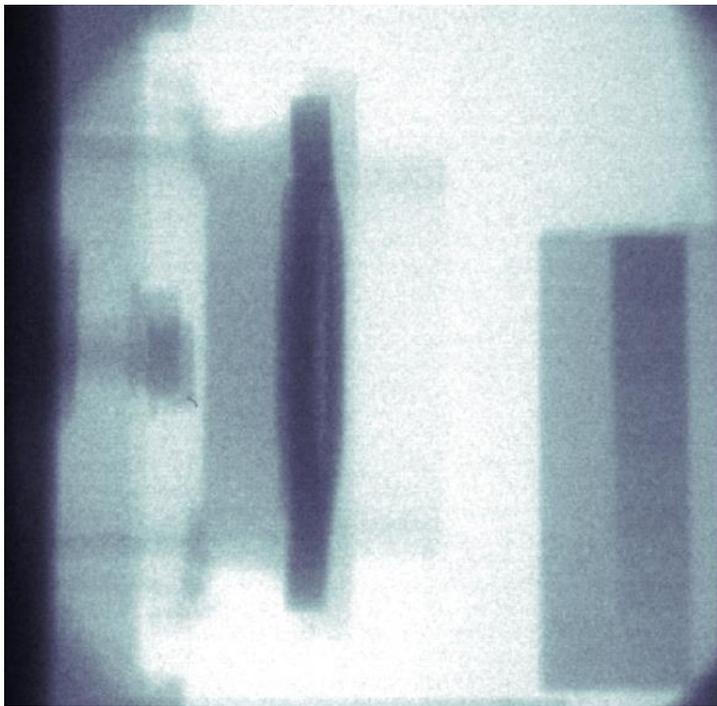


РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

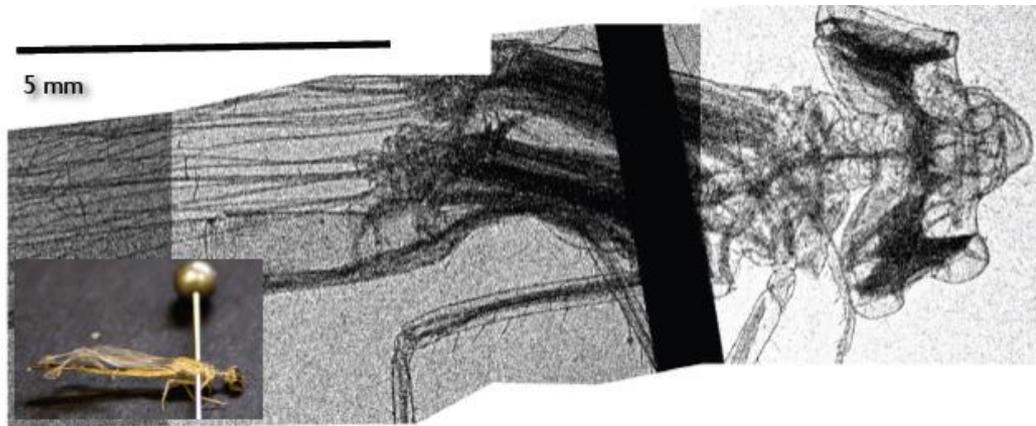


# Заключение

- Уникальный лазерный комплекс ЦЛФИ РФЯЦ-ВНИИТФ
- Широкий спектр востребованных задач



VS.



# Спасибо за внимание!

**Говрас Евгений Александрович**  
старший научный сотрудник НТО-1, к.ф.-м.н.

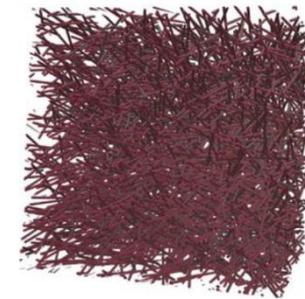
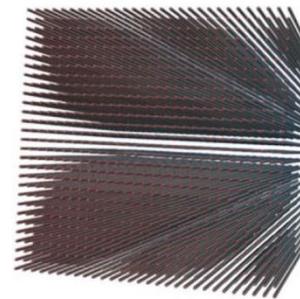
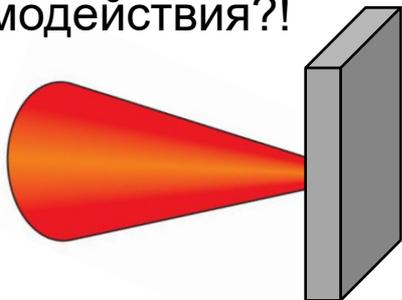
Моб. тел.: +7 (922) 722 04 20

E-mail: e.a.govras@vniitf.ru

25.02-01.03 2024

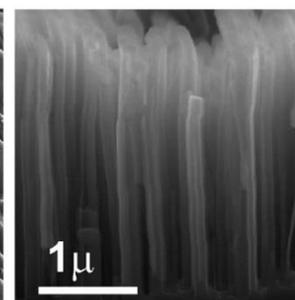
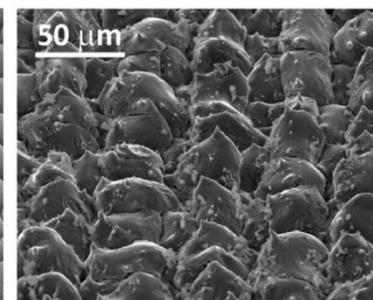
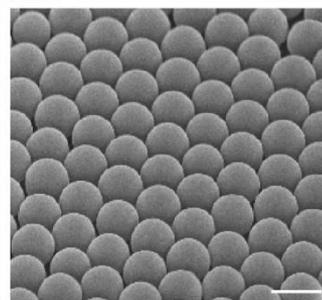
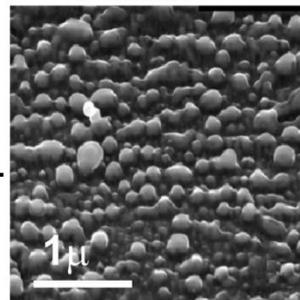
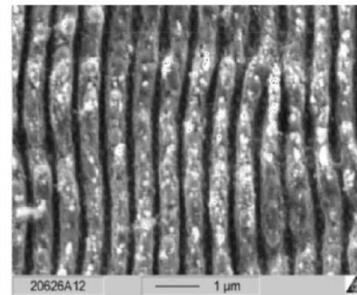
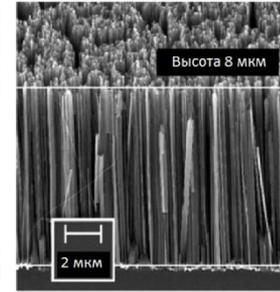
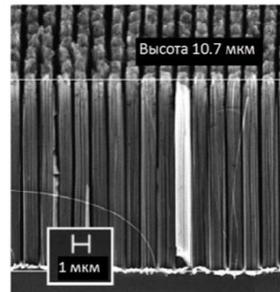
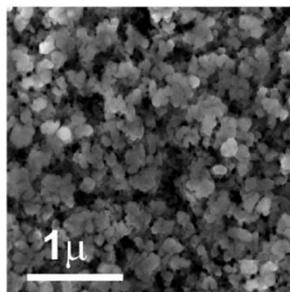
# Структурированные мишени

Как увеличить площадь взаимодействия?!



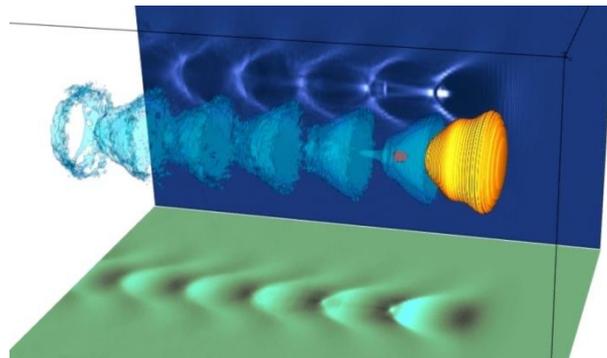
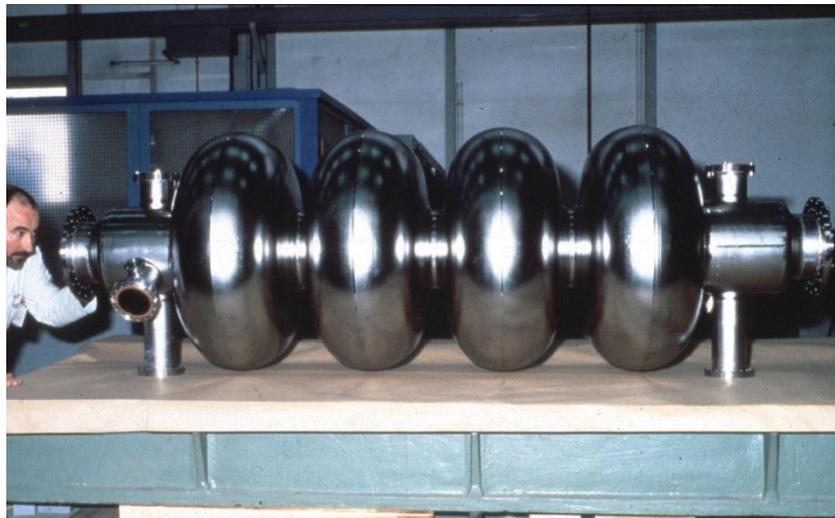
Изменение поверхности:

- химическое травление
- лазерная абляция
- нанотехнологии
- выращивание структур
- комбинации методов

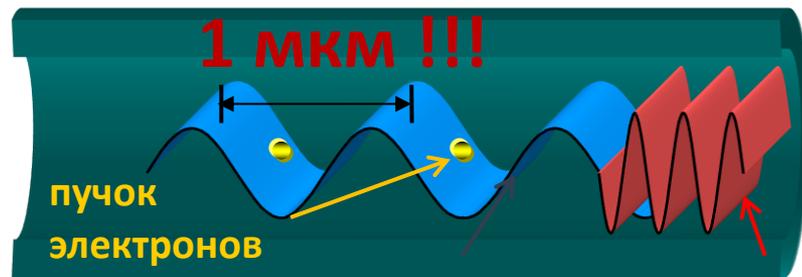


\* ВНИИТФ обладает технологиями (замкнутое экспериментальное пространство)

# Компактность



Плазменный канал

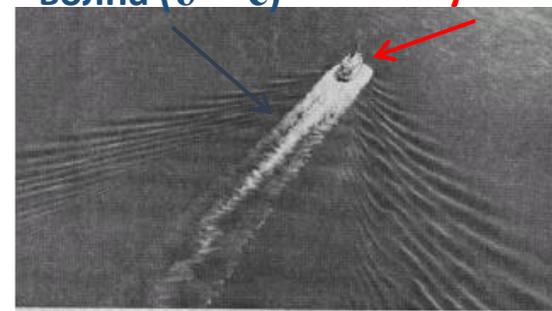
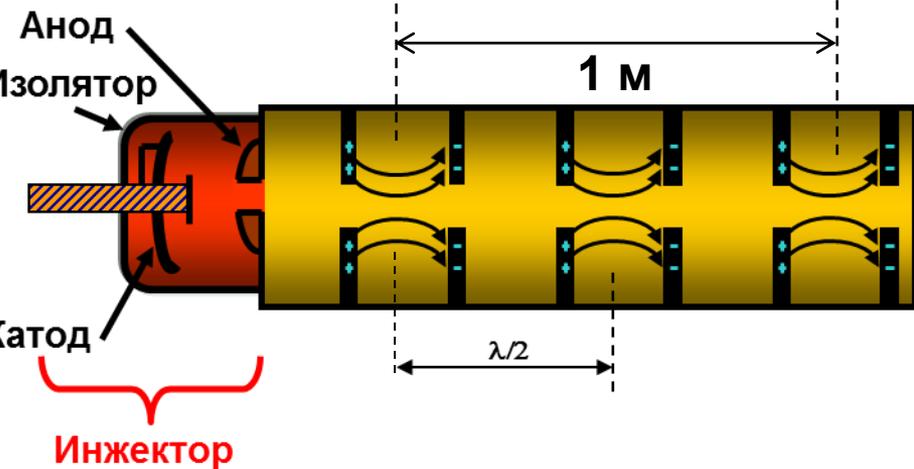


пучок электронов

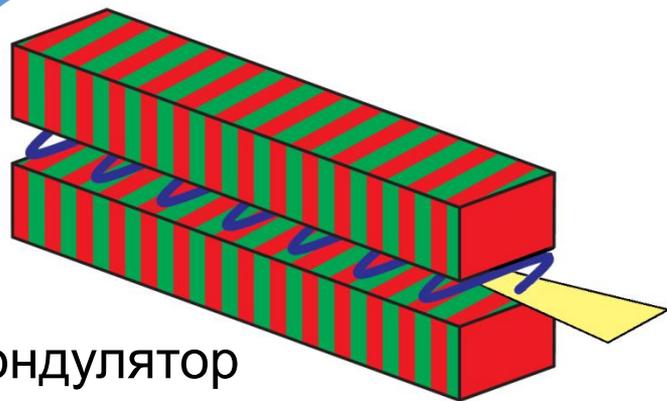
плазменная волна ( $v \sim c$ )

лазерный импульс

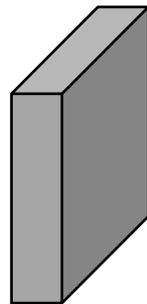
1 мкм !!!



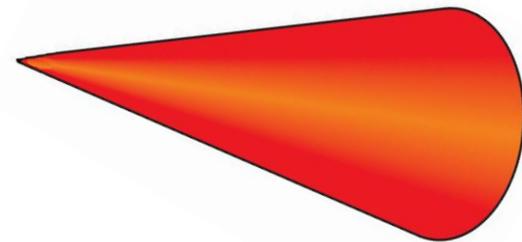
Электроны +



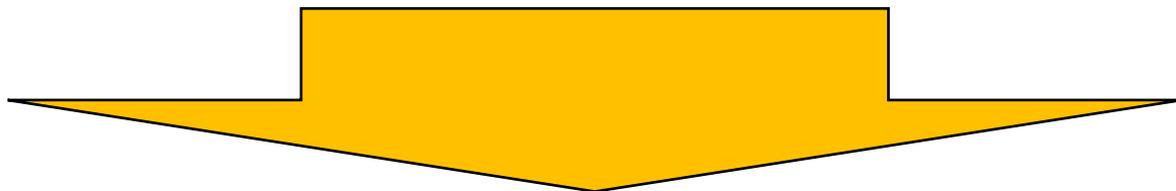
ондулятор  
(лазер на свободных  
электронах)



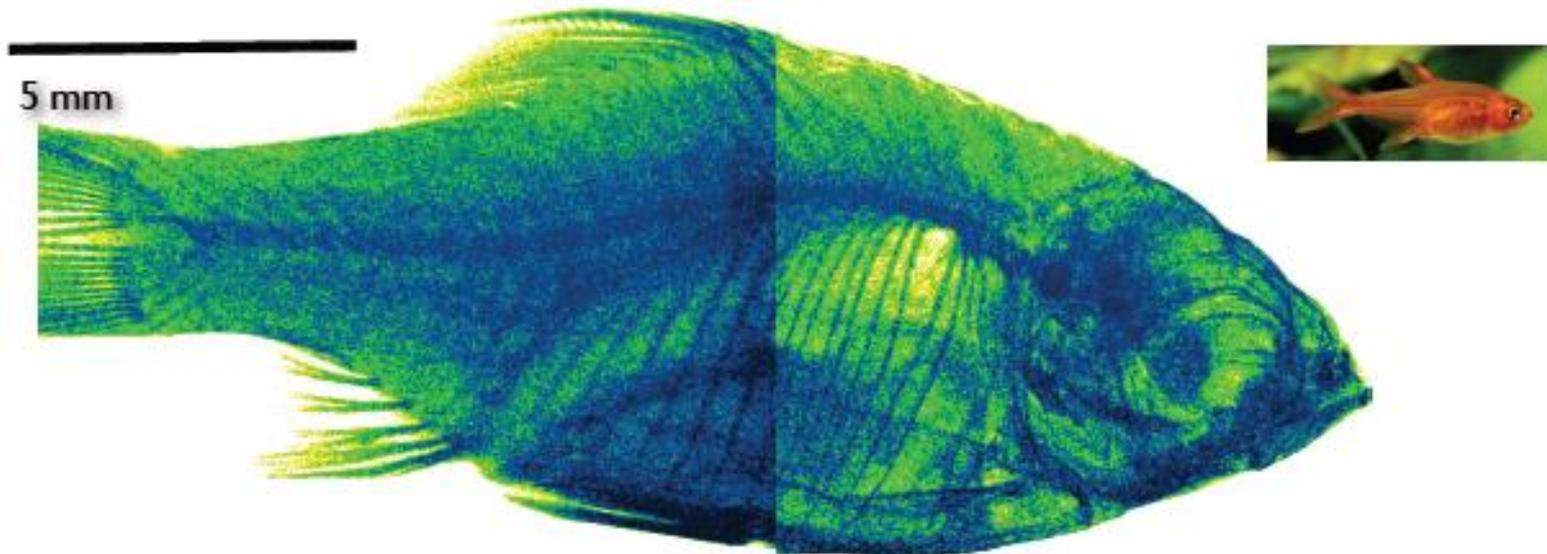
мишень с большим  
Z (тормозное  
излучение)



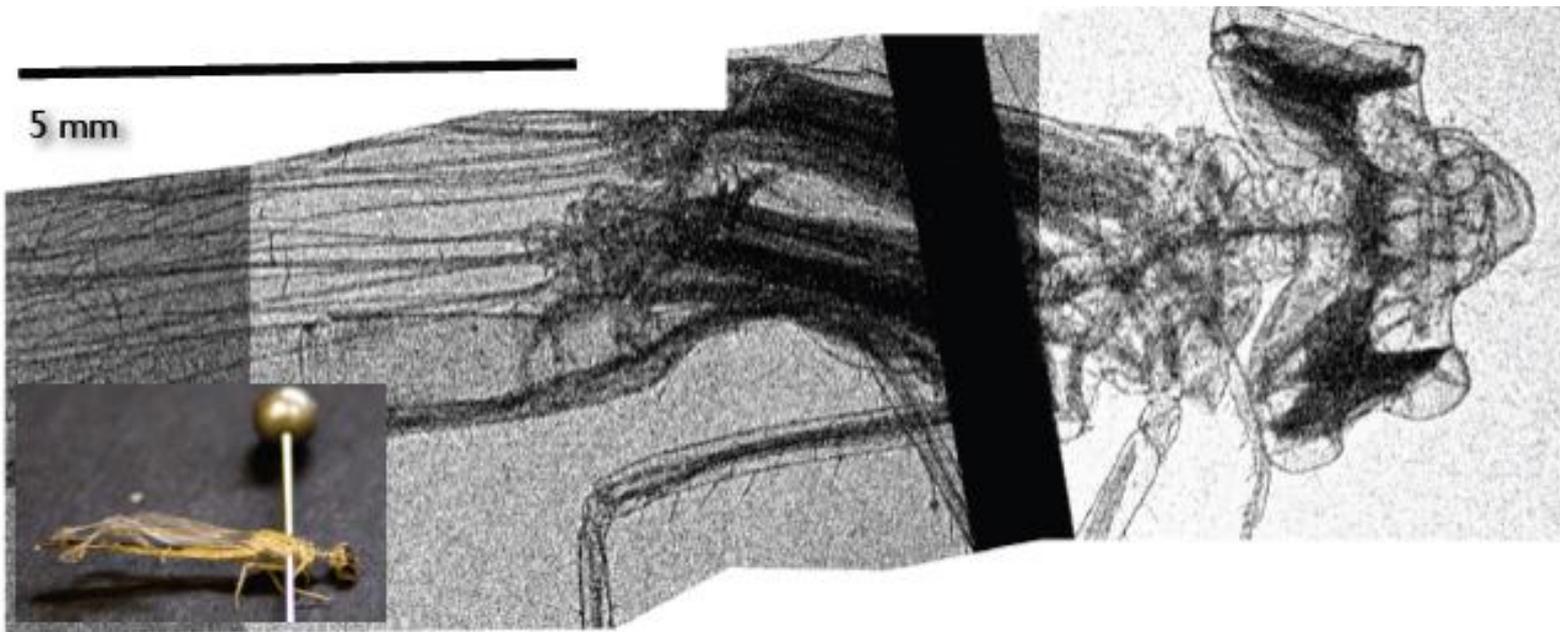
встречный лазерный  
пучок (обратное  
комptonовское  
рассеяние)



вторичное излучение от рентгена (КэВ) до гамма (сотни МэВ)

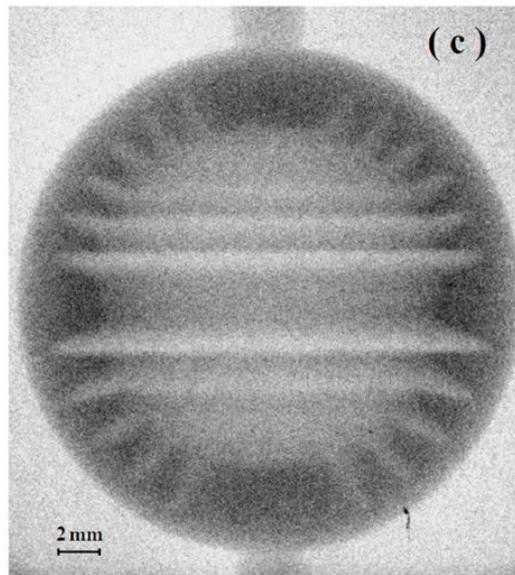
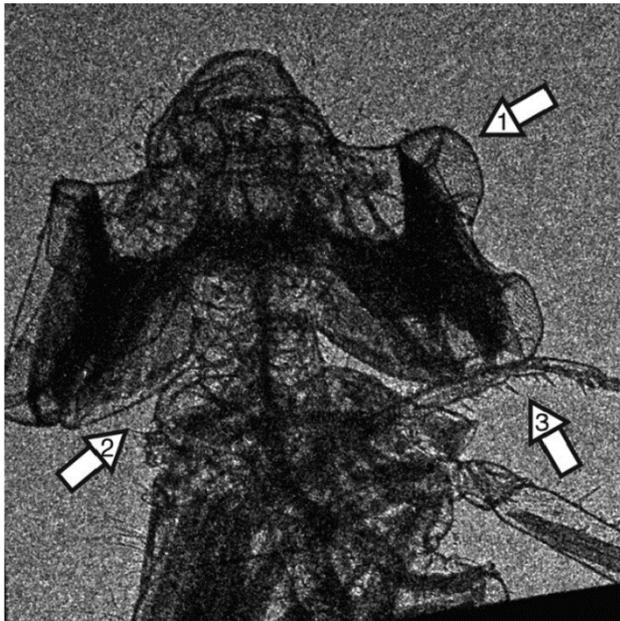


- ▶ X-ray **projection image** of Orange Tetra
- ▶ Camera & fish at 3 m from source
- ▶ Sum of 3-5 shots
- ▶ Camera had to be moved to capture entire specimen



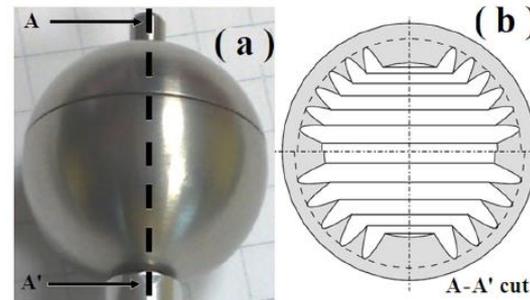
- ▶ X-ray **phase contrast image** of Damselfly
- ▶ Camera at 1.85 m from source / Damselfly 0.45 m ( $M=3$ )
- ▶ Single shot patchwork due to limited field of view of CCD camera

# Разрешающая способность



1 Дж, 30 фс  
 $3.6 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>  
+ газ [2]  
W-объект 20 мм +  
гамма до 140 МэВ  
(тормозное)  
разрешение 30 мкм

Hercules (США) [1]  
2.2 Дж, 32 фс,  $2 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> + He  
стрекоза + рентген 10 кэВ (бетатрон)  
объект 4 мм, разрешаются несколько мкм

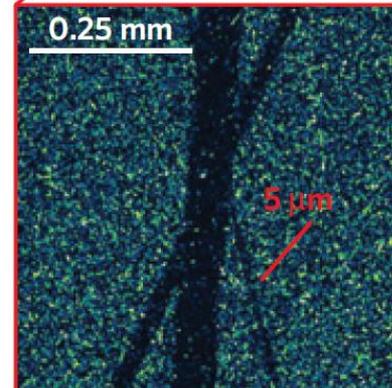
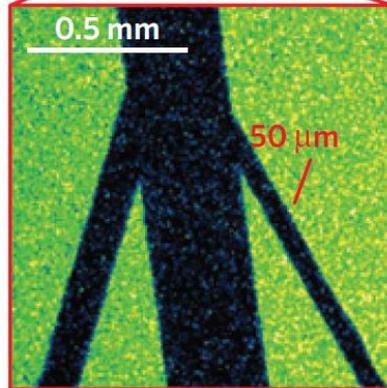
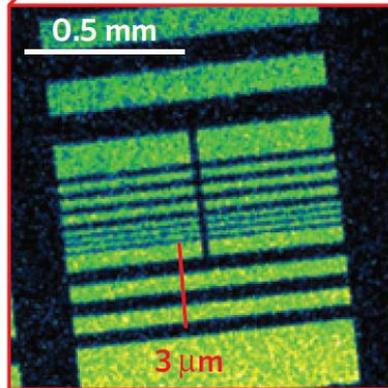
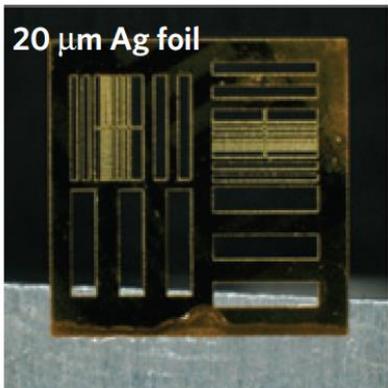
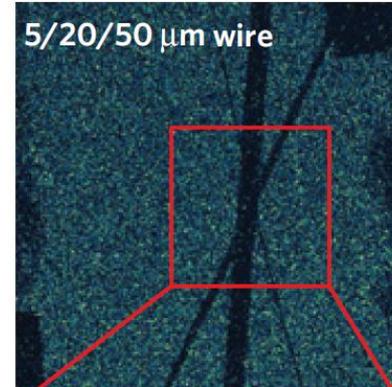
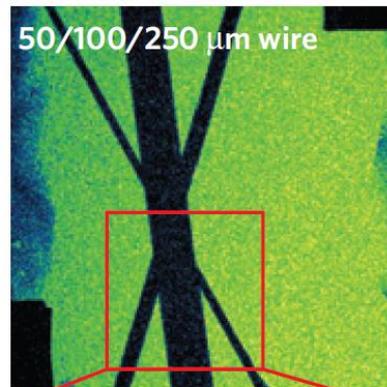
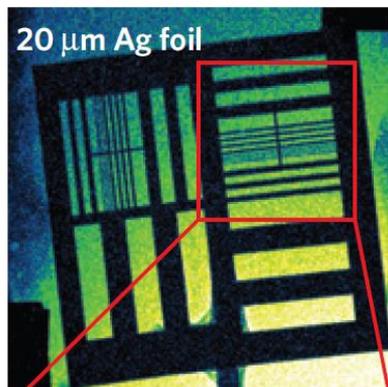
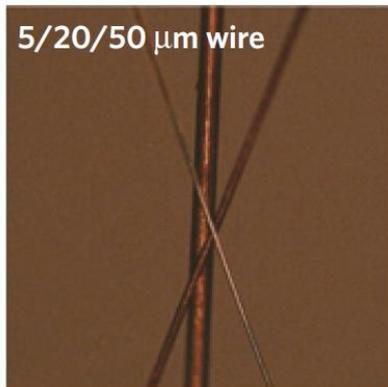


[1] S. Kneip et al., Appl. Phys. Lett. 99, 093701 (2011)

[2] A. Ben-Ismaïl et al, Appl. Phys. Lett. 98, 264101 (2011)

# Разрешающая способность

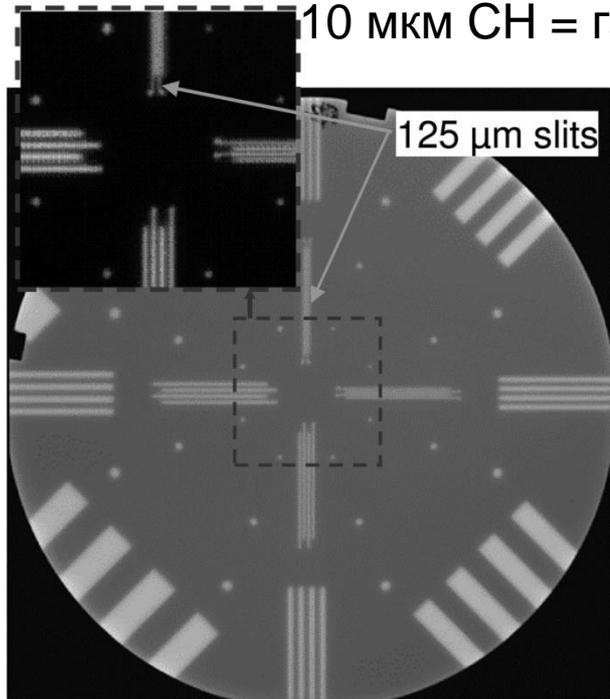
Hercules (США) 2.3 Дж, 32 фс,  $4.7 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> + He [1]



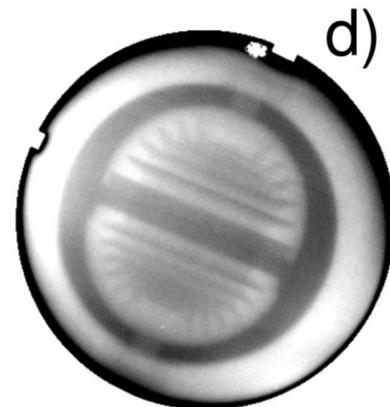
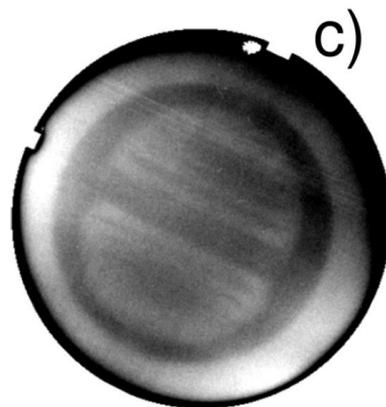
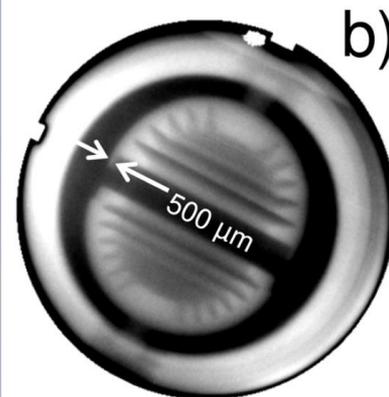
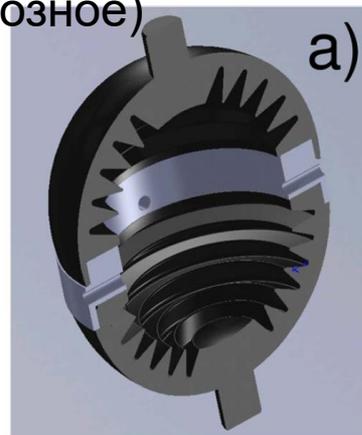
проволоки и мира – серебро, 100 кэВ (бетатрон), разрешаются 3 и 5 мкм

# Разрешающая способность

Омега (США) [1] 1.5 кДж, 9 пс,  $1.4 \cdot 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> +  
10 мкм СН = гамма до 4 МэВ (тормозное)

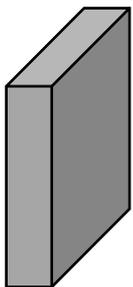


- a) W-объект 20 мм  
12.1 г/см<sup>2</sup>  
+ экраны
- b) 66 г/см<sup>2</sup>
- c) 102 г/см<sup>2</sup>
- d) 85 г/см<sup>2</sup>



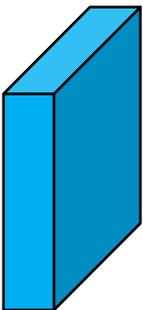
W-мира (16.5 мм) + экран 20 г/см<sup>2</sup>  
разрешаются 125 мкм

## мишень - конвертер



- 1) узконаправленный пучок высокоэнергетических нейтронов
- 2) инициирование ядерных реакций → поток осколков деления и т.д.
- 3) ядерная фармакология, создание короткоживущих изотопов для томографии (ОФЭКТ, ПЭТ)

## вторичная мишень

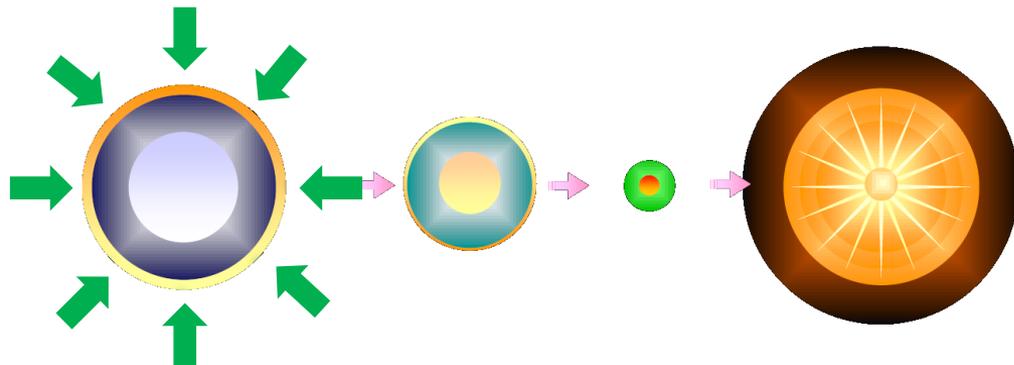


длительность пучка  $\ll$  время разлёта  
изохорический нагрев

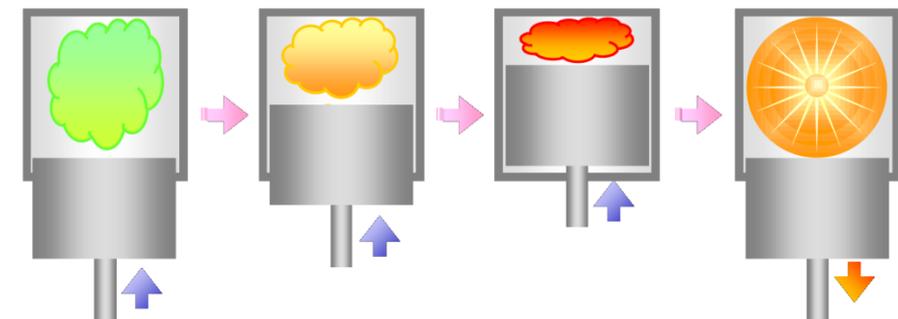
изучение WDM, тестирование УРСов

# «Быстрый поджиг»

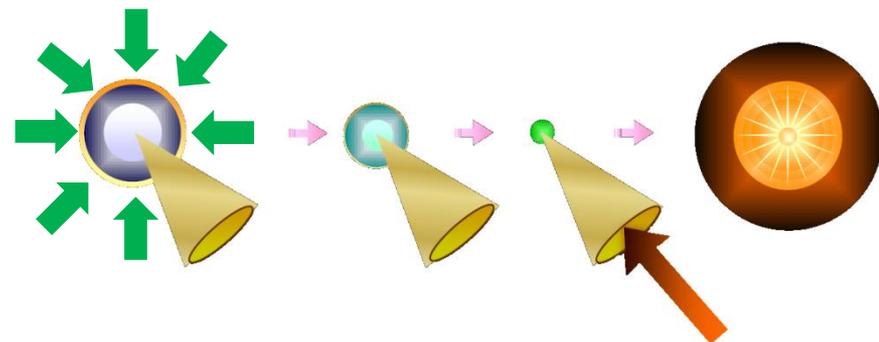
## Классический LTC



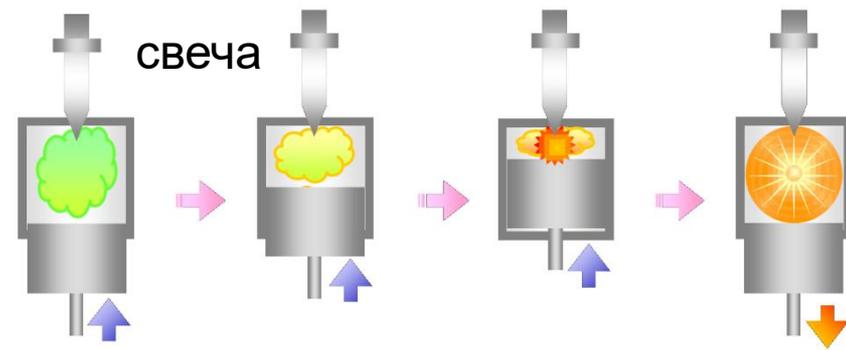
## дизельный двигатель



## «Быстрый поджиг»



## бензиновый двигатель



## Электроны

1. **Электронная терапия (?)**
2. Лазер на свободных электронах
3. **Источники вторичного излучения**  
(x-ray,  $\gamma$ , THz)

## Ионы

1. Адронная терапия рака
2. Ядерная физика
3. Астрофизика «на столе»
4. Нейтронный источник
5. Ионная имплантация
6. **Изохорический нагрев**
  1. ЛТС. «Быстрый поджиг»
  2. **Радиационная стойкость**
  3. Инжекторы для ускорителей
  4. Медицинские изотопы
  5. Радиография

Уровень	Оборудование	Стоимость
1	Ручка	\$ 1
2	Компьютер	\$ 1 000
3	Кластер на пользователя (\$1 М на 100 человек)	\$ 10 000
4	Экспериментальная установка	\$ 1 000 000
5	Установка «Mega Science» (БАК - \$ 6В*, NIF - \$ 8В**)	\$ 10 000 000 000

1 : 10<sup>3</sup> : 10<sup>4</sup> : 10<sup>6</sup> : 10<sup>10</sup>

Академическая наука на «Mega Science»:

- 1) Коллаборация (внешняя политика)
- 2) Центры коллективного пользования
- 3) Никак

\* - международная коллаборация

\*\* - «в одного» (LMJ, Саров, ...)

		
<b>Академическая</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) выбор темы</li><li>2) конференции, поездки</li><li>3) отчётность</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) грантовая система</li><li>2) зарплата (если не с оборонкой)</li></ol>
<b>«Прикладная»</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) доступ к установкам</li><li>2) востребованность работы</li><li>3) достижение чётких результатов (вплоть до железки)</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) ограничения с гос. тайной</li></ol>