



# Экспериментальный лазерно-физический комплекс «ЭЛЬФ»

## Статус проекта

---

*Кузнецов А.П.<sup>1</sup>, Деркач В.Н.<sup>2</sup>, Гаранин С.Г.<sup>2,1</sup>, Лобанов А.В.<sup>1</sup>, Кравченко В.В.<sup>1</sup>, Михайлюк А.В.<sup>1</sup>, Мелехов А.П.<sup>1</sup>, Кадыров Д.Э.<sup>1</sup>, Карпов Н.И.<sup>1</sup>, Царев М.С.<sup>1</sup>, Дешин Д.А.<sup>1</sup>, Дудалин М.С.<sup>1</sup>, Волков К.И.<sup>1</sup>, Казарцев Г.А.<sup>1</sup>, Самойлов В.И.<sup>1</sup>, Радыгин Д.Е.<sup>1</sup>, Абакумов Ю.М.<sup>1</sup>, Куликов М.А.<sup>1</sup>, Дегтярев М.В.<sup>1</sup>, Рындык Е.Р.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики - Российский федеральный ядерный центр, Саров, Россия



Лазерный комплекс - «ЭЛЬФ» НИЯУ МИФИ

# БЕЛАЯ КНИГА

Наука и технологии будущего на  
Лазерном комплексе «ЭЛЬФ»

ELF — Experimental Laser Facility of NRNU MEPHI  
Science and technology with Ultra-intense Lasers

Акунец А.А.  
Алхимова М.А.  
Андреев Н.Е.  
Беляев В.С.  
Борисенко Н.Г.  
Бочкарев С.Г.  
Брантов А.В.  
Бурдонов К.Ф.  
Бухарский Н. Д.  
Быченков В.Ю.  
Вергунова Г. А.  
Глазырин С.И.  
Громов А.И.  
Гуськов С.Ю.  
Демченко Н.Н.  
Дороготовцев В.М.  
Жидков А.Г.  
Иногамов Н.А  
Корнеев Ф.А.  
Кучугов П.А.  
Кузнецов А.П.  
Литвин В.С.  
Ломоносов И.В.  
Макаров С.С.  
Минцев В.Б.  
Николаев Д.Н.  
Пастухов А.В.  
Пикуз С.А.  
Пименов В.Г.  
Розмей О.Н.  
Рязанцев С.Н.  
Соловьев А.А.  
Толоконников С.М.  
Яхин Р.А.



# Программа научных исследований

## **Глава 1. Исследования, связанные с задачами ЛТС**

§ 1. Генерации сверхмощных ударных волн применительно к исследованиям уравнения состояния вещества и гидродинамических неустойчивостей

§ 2. Лазер-плазменное взаимодействие применительно к задачам лазерного термоядерного синтеза

## **Глава 2. Исследования свойств вещества при высоких давлениях и плотностях**

§ 1. Исследования свойств вещества при высоких давлениях и плотностях

§ 2. Лазерное ударное упрочнение материалов

## **Глава 3. Задачи лабораторной астрофизики и междисциплинарные задачи**

§ 1. Моделирование астрофизических джетов

§ 2. Исследование бесстолкновительных ударных волн

§ 3. Моделирование генерации космических лучей

§ 4. Формирование направленных плазменных потоков в сильных магнитных полях

## **Глава 4. Задачи ускорения частиц и генерации излучения**

§1. Задачи по генерации сильноточных пучков супер-пандеромоторных электронов в режиме прямого лазерного ускорения - основа создания лазерных источников излучения и частиц

§2. Задачи по стохастическому нагреву и ускорению электронов/ионов при лазерном облучении плотных газовых струй, мишеней с преплазмой и структурированных мишеней

§3. Многофункциональный лазерный источник нейтронов для физики экстремальных состояний вещества и материаловедения

## **Глава 5. Физическое обоснование энергетических технологий на основе безнейтронной ядерной реакции $p-^{11}\text{B}$**

§1 Обзор экспериментальных исследований ядерной реакции  $p-^{11}\text{B}$  в лазерных экспериментах

§2 Ядерные реакции  $p-^{11}\text{B}$  как энергетическая основа космических технологий



# ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ МИРА

ARCTIC OCEAN

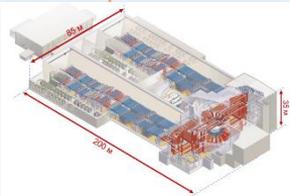
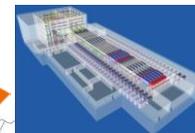


★ - Национальные лазерные установки

SOUTHERN OCEAN

# ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ МИРА

ARCTIC OCEAN



★ - Национальные лазерные установки

SOUTHERN OCEAN

# NIF – National Ignition Facility

В 2009 году в США была введена в эксплуатацию самая мощная лазерная установка в мире

Основные параметры установки:

число каналов – 192;

Оптических элементов (~1 м) – 7500

Оптических элементов – 26000

Контрольных точек – 60000

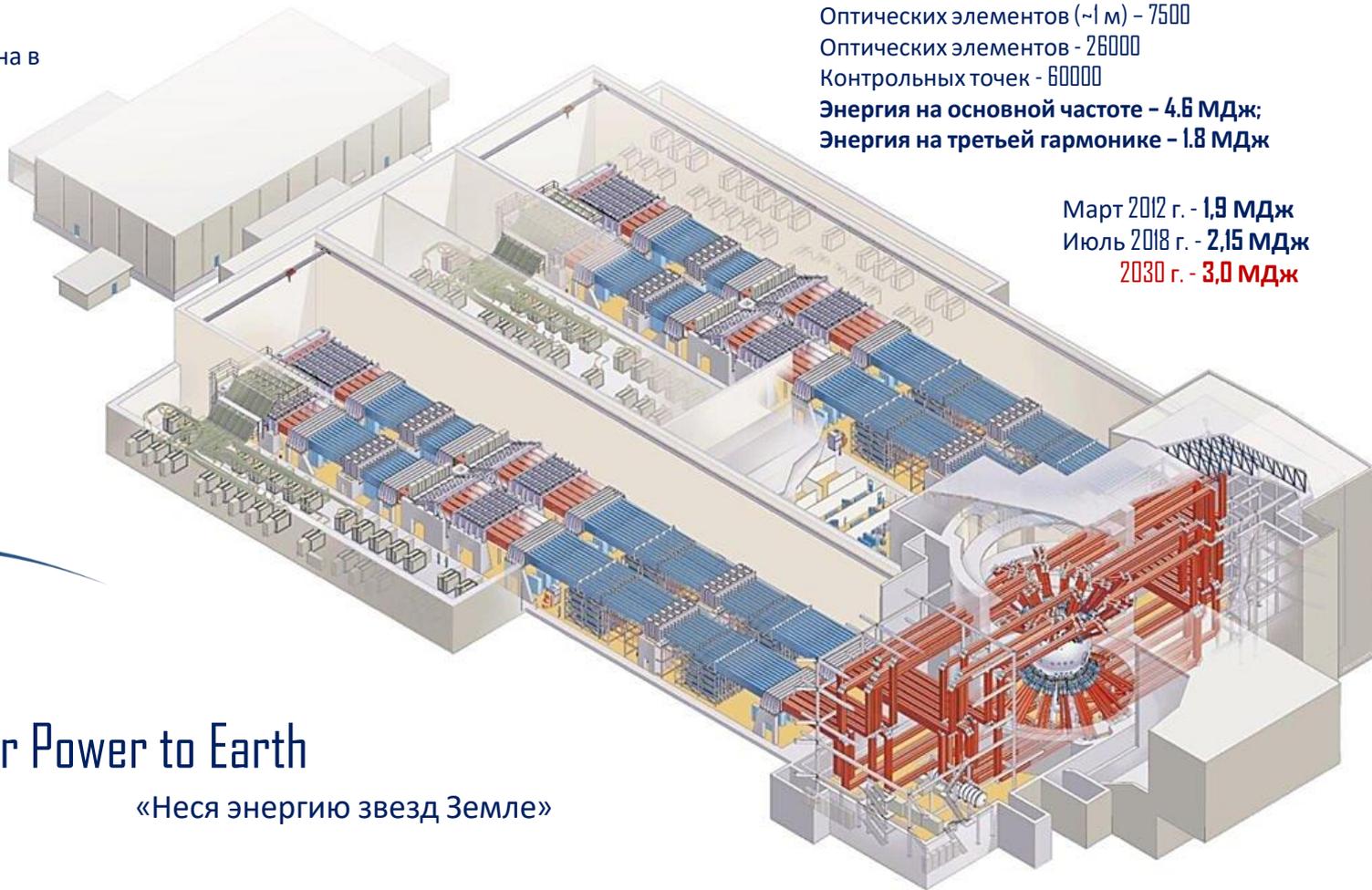
**Энергия на основной частоте – 4.6 МДж;**

**Энергия на третьей гармонике – 1.8 МДж**

Март 2012 г. - **1,9 МДж**

Июль 2018 г. - **2,15 МДж**

2030 г. - **3,0 МДж**



# NIF

NIF's slogan is

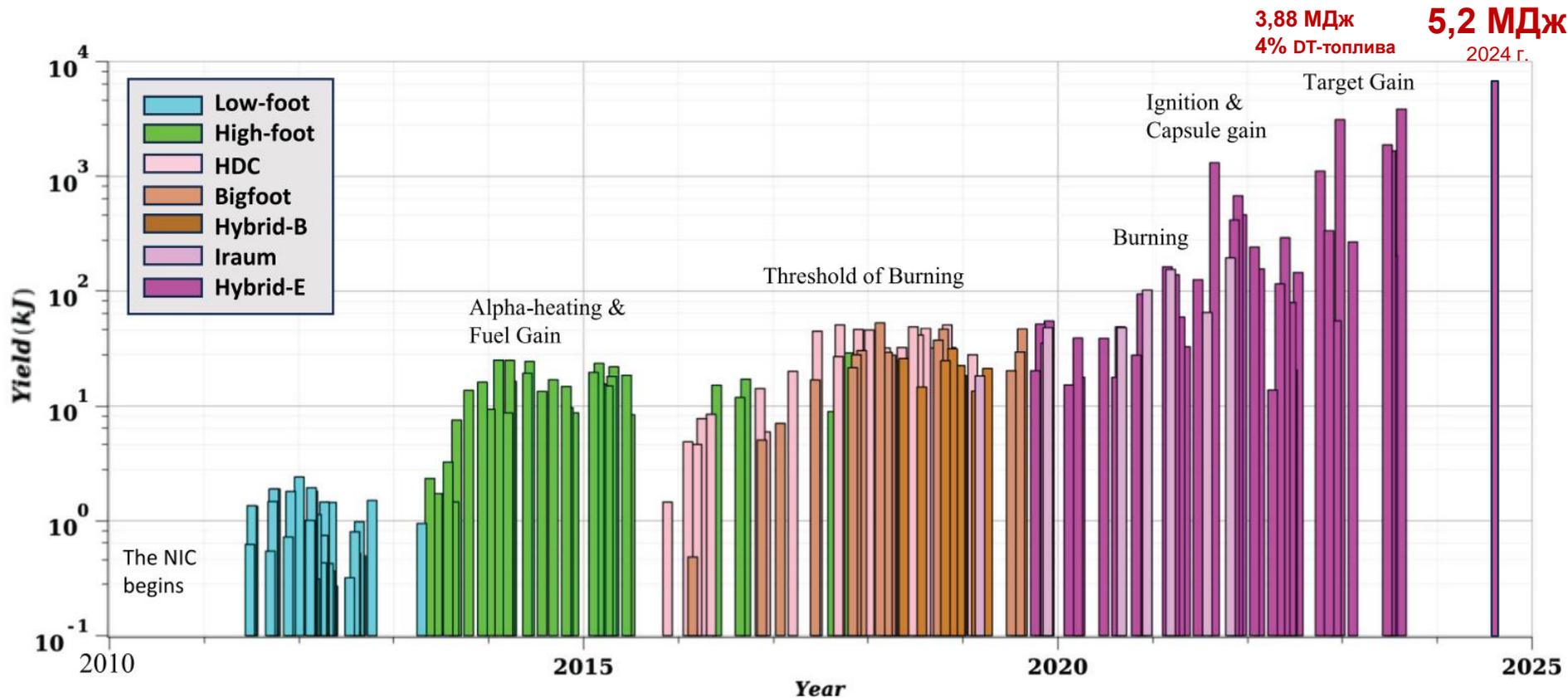
## Bringing Star Power to Earth

«Неся энергию звезд Земле»

Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment

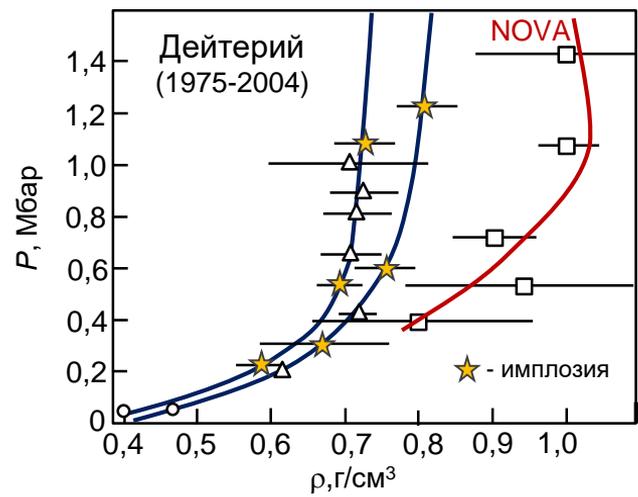
H. Abu-Shawareb *et al.*<sup>\*</sup>  
(The Indirect Drive ICF Collaboration)

(Received 27 October 2023; accepted 3 January 2024; published 5 February 2024)

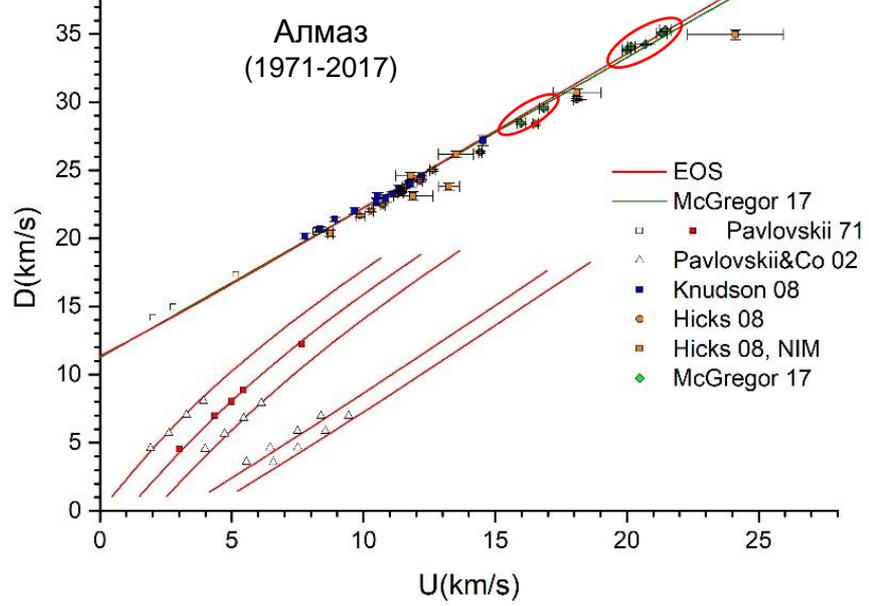


# Уравнения состояния материалов

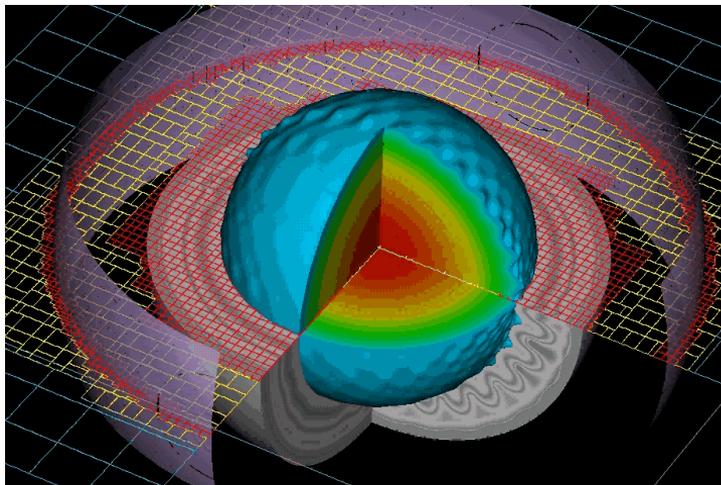
### Ударное сжатие P-ρ



### Ударное сжатие D-u (P-V)



## Гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание



Параметр	Астрофизический объект	Лабораторная (лазерная) плазма
$V$ , км/с	$\sim 100 - 1000$	$\sim 1000$
$r$ , мм	$\sim 10^{18}$	$\sim 1$
$t$ , с	$\sim 10^{10}$	$\sim 10^{-8}$

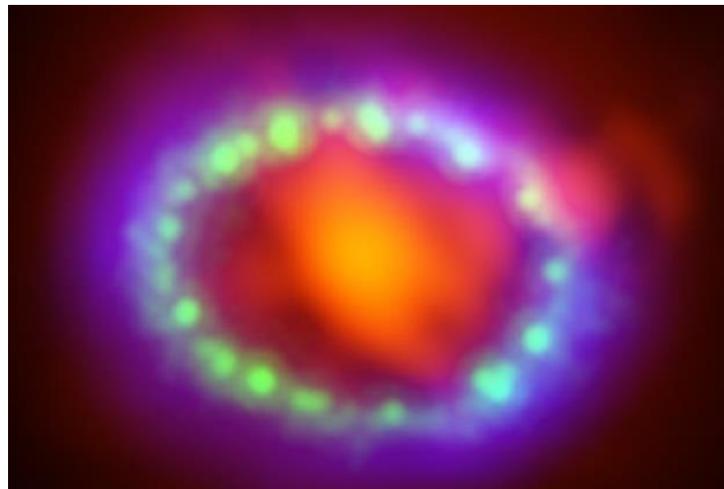
$I_1 = vt / r = St$  Число Струхаля – безразмерная величина, один из критериев подобия нестационарных течений жидкостей и газов

23 февраля 1987 года

## Вспышка сверхновой звезды SN 1987A

(туманность Тарантул в Большом Магеллановом  
Облаке

(168 тысяч световых лет)



### Остаток SN 1987A

наложение снимков в разных диапазонах спектра

- Радиодиапазон - красный цвет;
- Видимый диапазон - зелёный цвет;
- Рентгеновский диапазон - синий цвет

# Программа совместных РАН-Росатом исследований в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами

Решение совещания «Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами» (2-3 апреля 2018 г. ИПФ РАН г. Нижний Новгород)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЛФИ РЯЦ-ВНИИЭФ  
академик РАН  
С.Г. Гаранин

  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

СОГЛАСОВАНО

Президент РАН  
академик РАН  
А.М. Сергеев

  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИПФ РАН  
чл.-корр. РАН  
Г.Г. Денисов

  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

СОГЛАСОВАНО

Академик-секретарь ОЭММПУ РАН  
академик РАН  
Б.Е.Фортов

  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РЕШЕНИЕ

совещания "Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами"

Предлагается поддержать создание многофункционального лазерного комплекса «ELF» в НИЯУ МИФИ для отработки, тестирования и верификации экспериментальных методик программы исследований на мегаджоульной установке. Наличие такого комплекса позволит интенсифицировать комплексные исследования в области физики высоких плотностей энергии, в частности, ударных волн рекордных параметров, свойств уравнения состояния вещества, неустойчивостей образующейся горячей плазмы, транспортных и радиационных характеристик вещества от параметров воздействующего мощного лазерного импульса, с привлечением широкого круга научных организаций, сосредоточенных в московском регионе.

Совещание обращается к ГК «Росатом» с просьбой о поддержке настоящего Решения.

Директор ОИВТ РАН  
академик РАН


О.Ф. Петров

ВРИО директора ИОФ РАН  
чл.-корр. РАН


С.В. Гарин

Директор ФИАН  
чл.-корр. РАН


Н.Н. Калачевский

Директор ИНАСАН  
чл.-корр. РАН


Д.В. Бисикало

NOVA (USA)

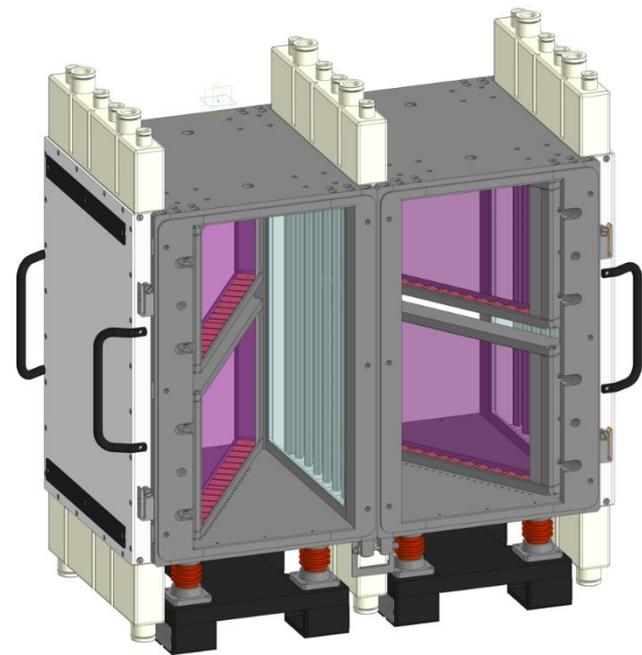


LULI2000 (France)



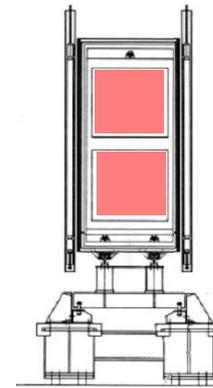
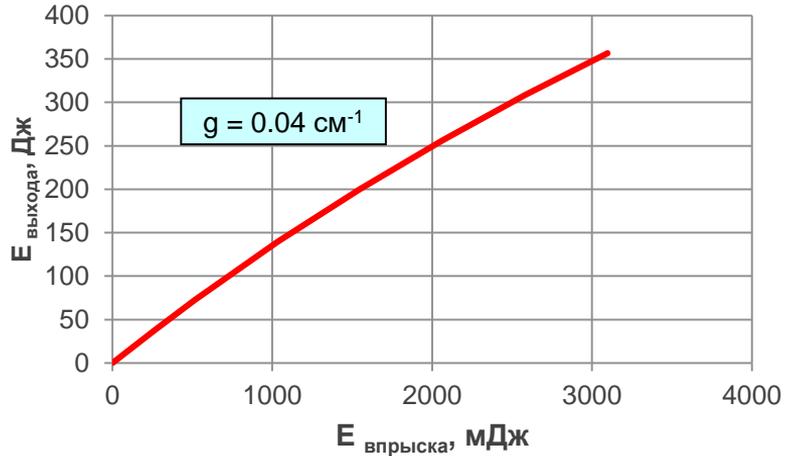
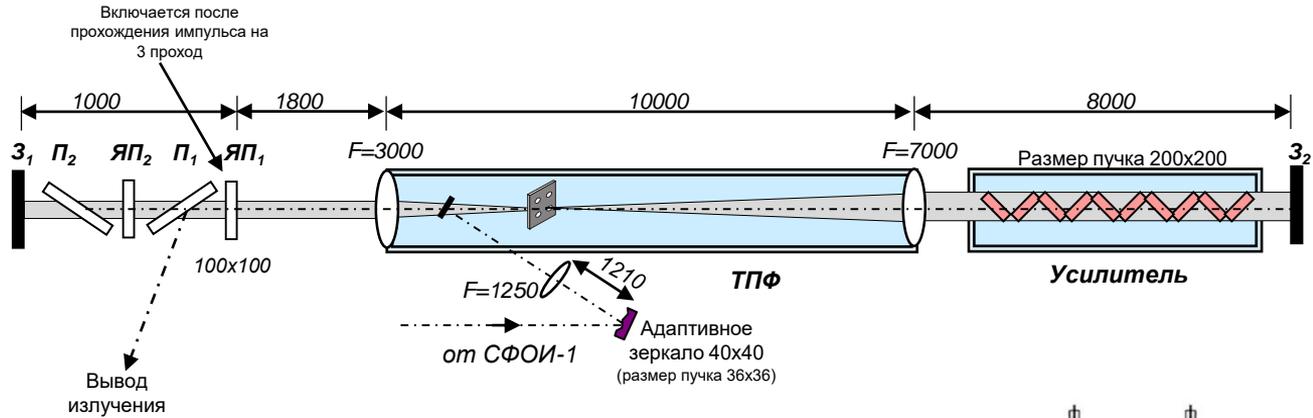
Phelix (Germany)

Луч (РФЯЦ ВНИИЭФ)



Усилительный модуль

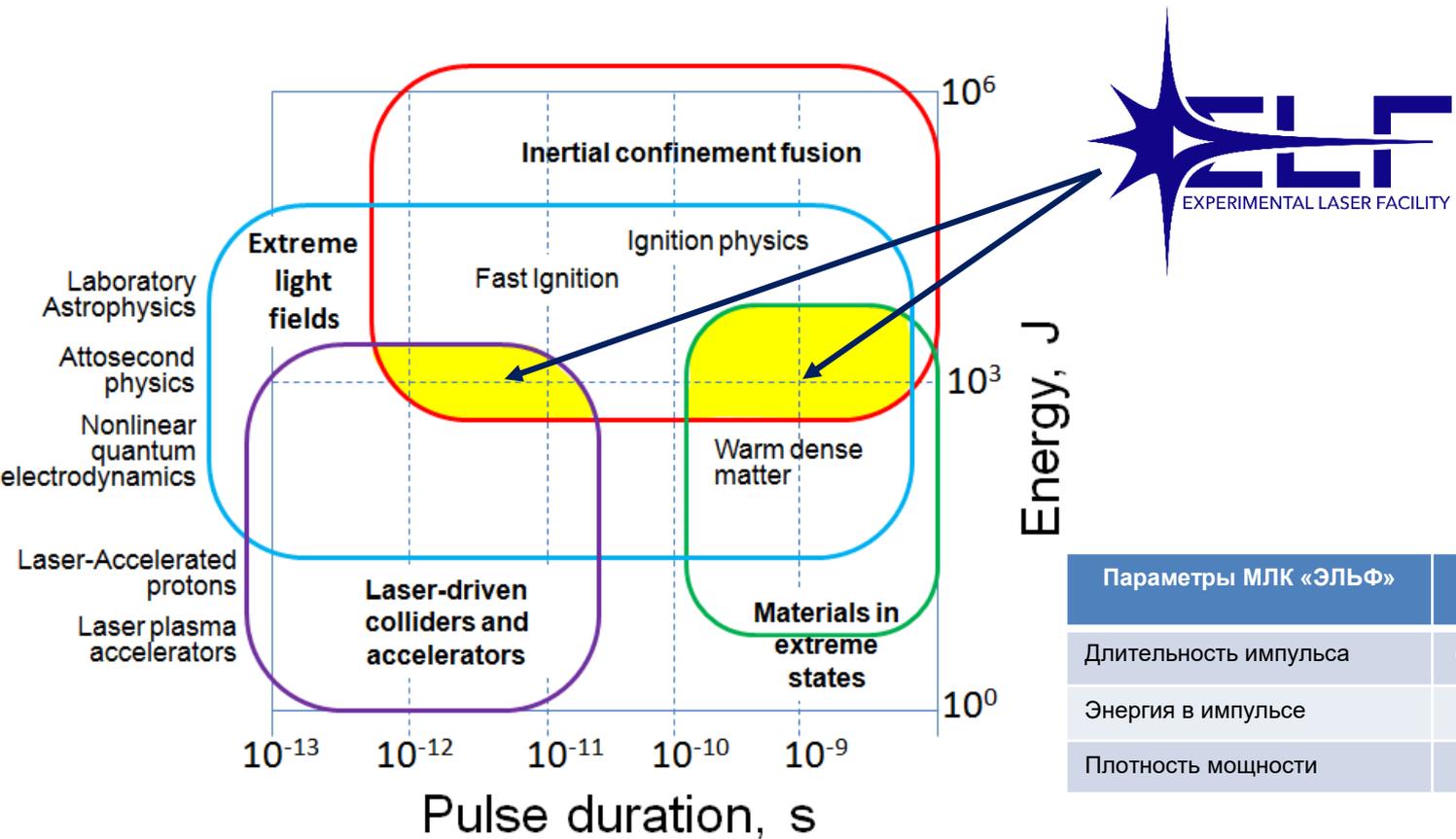
# Проект мощной лазерной установки «МИФИ» (2015 г.)



Модуль силового усилителя  
(два независимых канала)

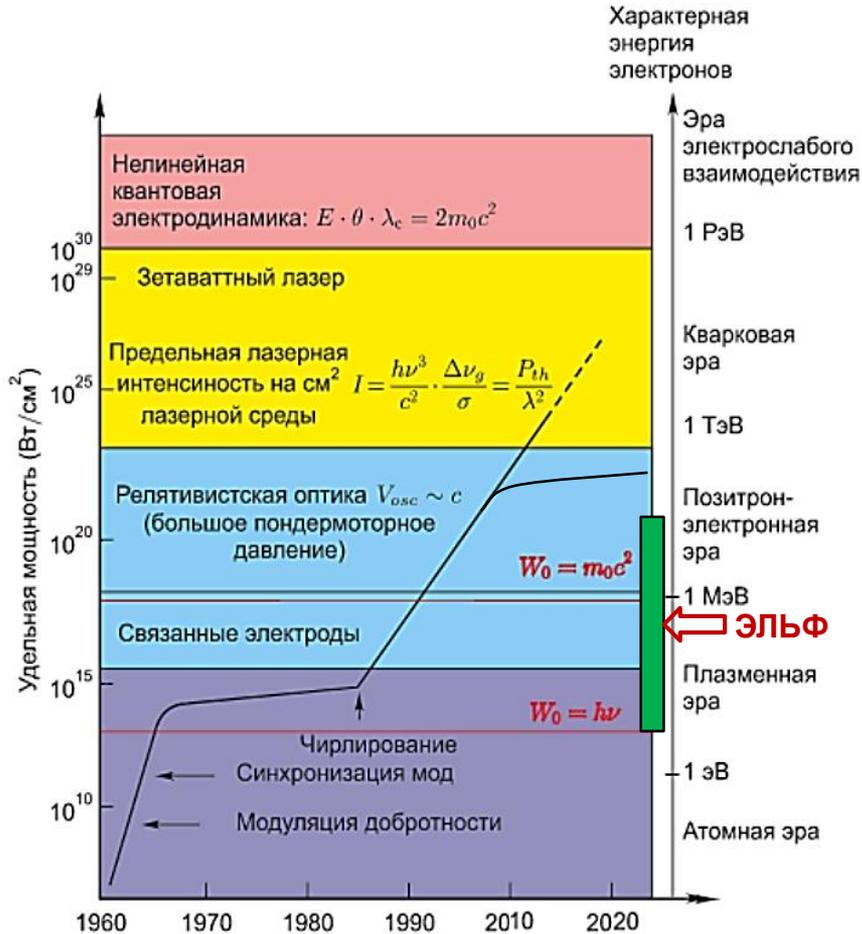


# Исследовательская повестка для лазеров килоджоульного уровня энергии

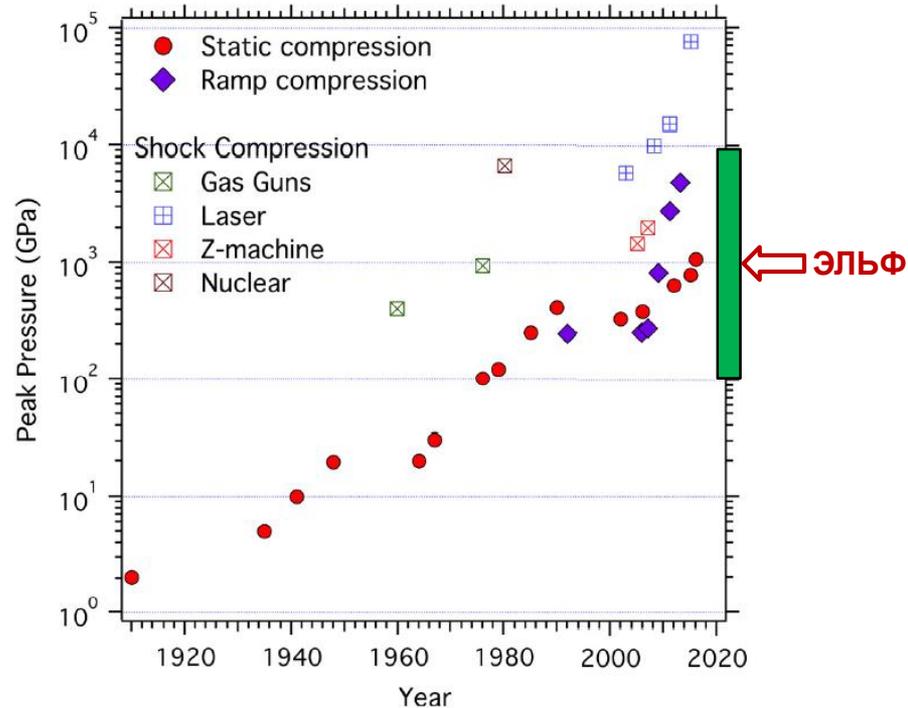


Параметры МЛК «ЭЛЬФ»	Канал 1 (этап 1 - 2023)	Канал 2 (этап 2- 2025)
Длительность импульса	$(1,0 - 10) \cdot 10^{-9}$ с	$1,0 \cdot 10^{-12}$ с
Энергия в импульсе	8000 Дж ( $1\omega$ )	200 Дж
Плотность мощности	$10^{16}$ Вт/см <sup>2</sup>	$10^{20}$ Вт/см <sup>2</sup>

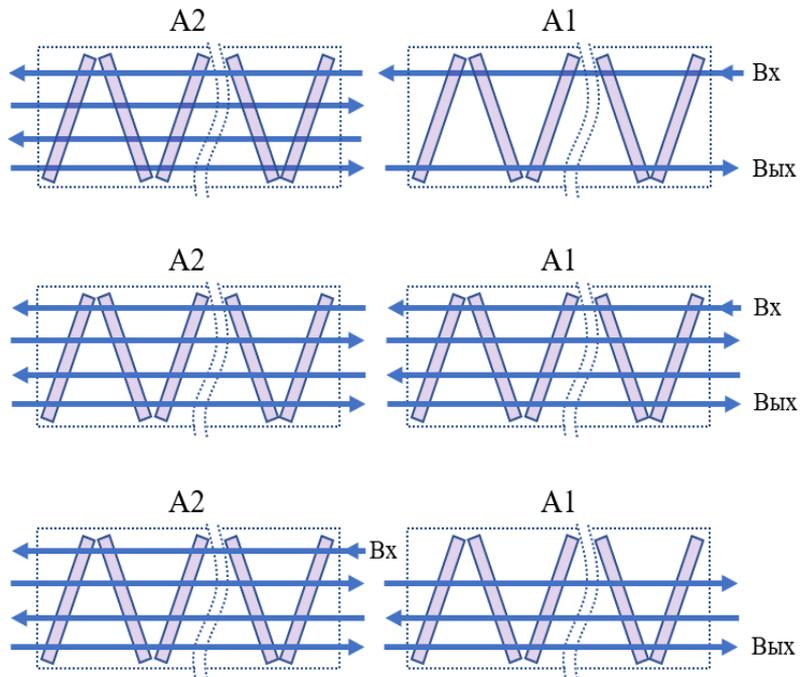
# Интенсивность лазерного излучения



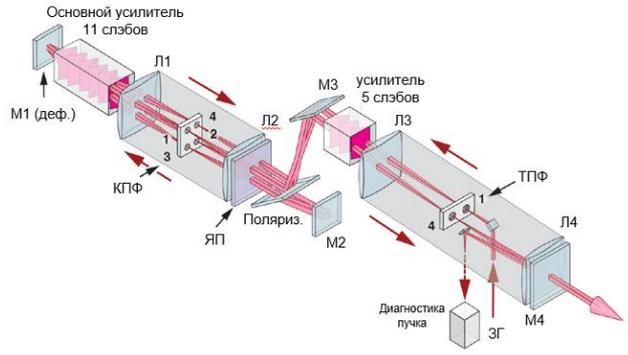
# Исследование ударной сжимаемости веществ



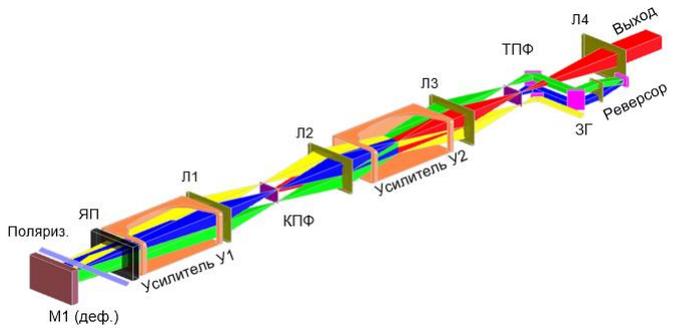
# Оптические схемы усиления лазерного излучения



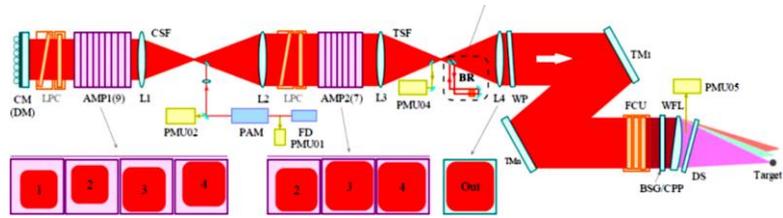
NIF – National Ignition Facility  
США



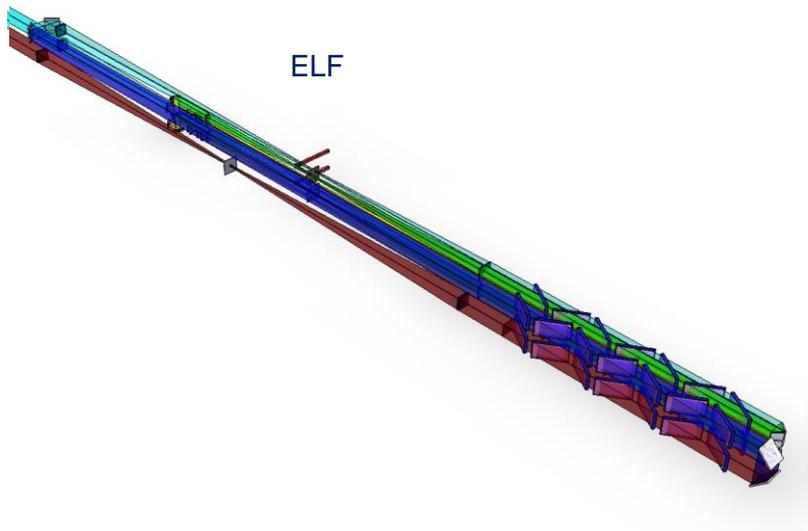
LMJ – Laser Mega Joule  
(Франция)



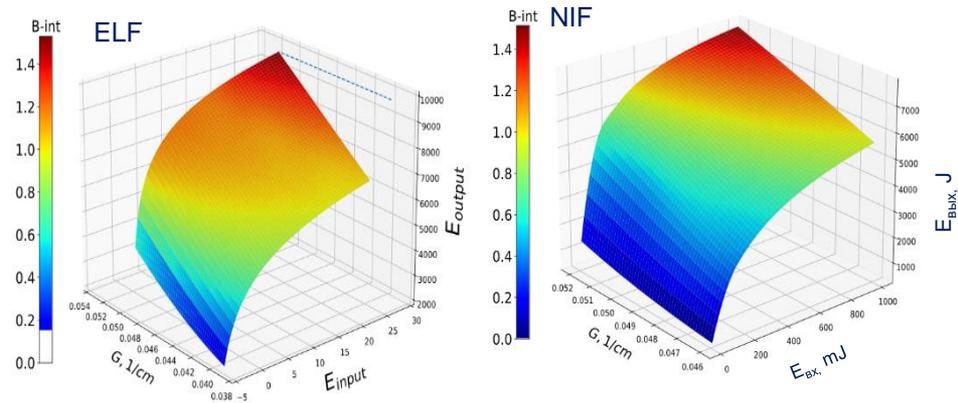
Shenguang-III  
(Китай)



# Усилитель лазерного комплекса «ЭЛЬФ»



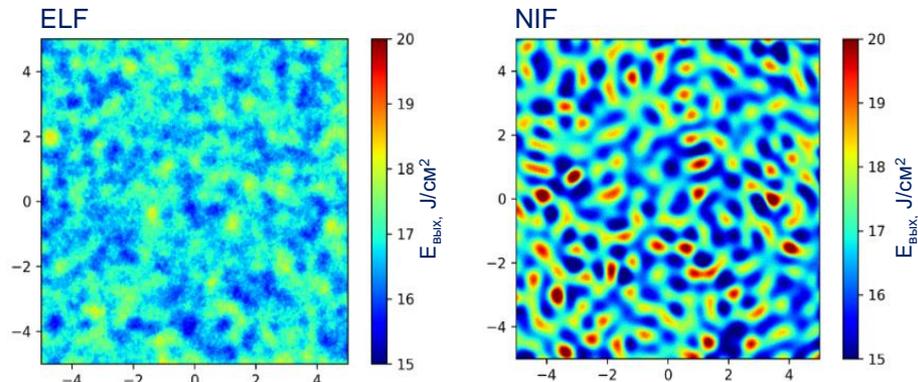
Зависимость выходной энергии от входной энергии и коэффициента усиления



Распределения энергии в сечении пучка

## Преимущества системы усиления МЛК «ЭЛЬФ»:

- Повышение КПД генерации излучения из запасенной энергии;
- Увеличение выходной энергии с канала;
- Снижение расходимости;
- Уменьшение амплитуды модуляции распределения интенсивности;
- Повышение функциональных возможностей установки;
- Увеличение частоты проведения экспериментов;
- Улучшение эргономики размещения;
- Снижение стоимости канала;
- Уменьшение эксплуатационных расходов.



# Общая структурная схема МЛК «ЭЛЬФ»



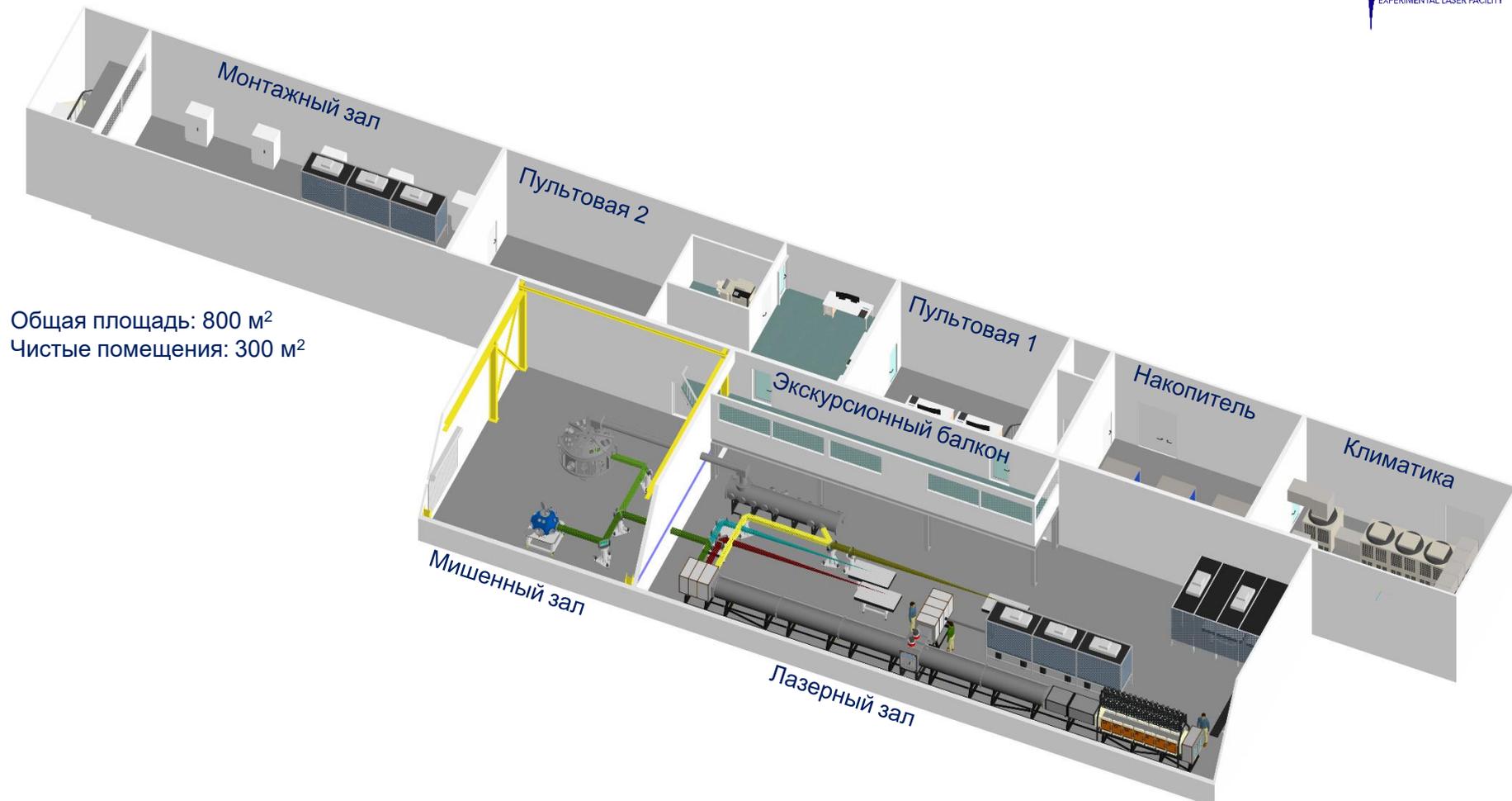
## МЛК «ЭЛЬФ»



### Участие организаций – партнеров в проекте

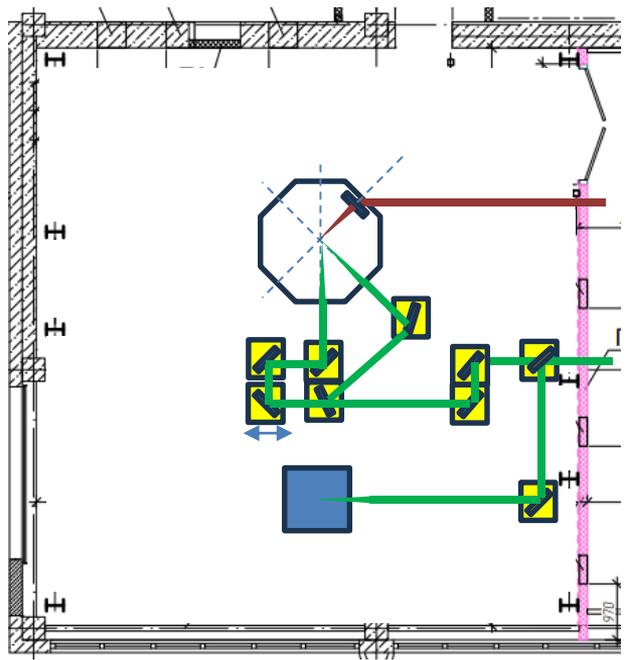
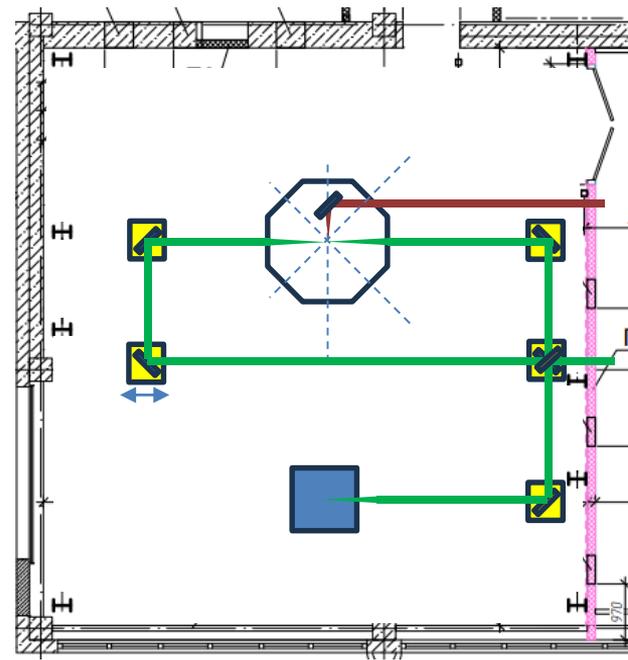
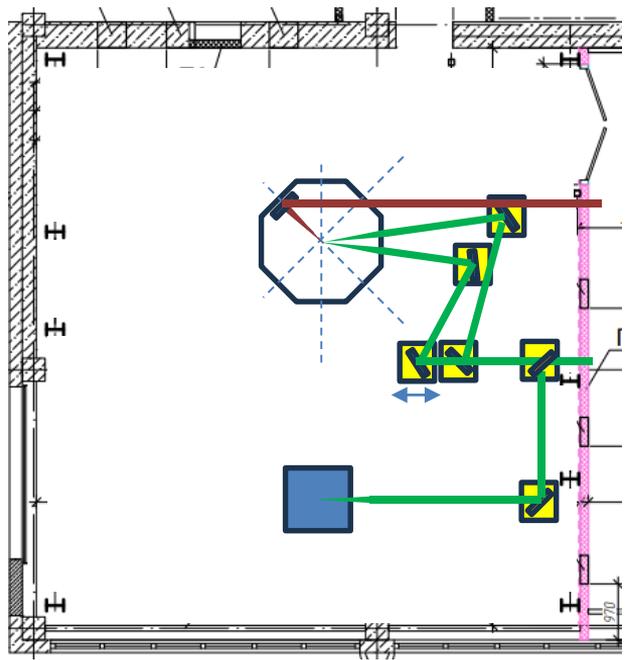
- РФЯЦ ВНИИЭФ, НИЯУ МИФИ
- ИПФ РАН
- НИЯУ МИФИ
- ФИАН
- ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ТРИНИТИ, ФИАН, НИЯУ МИФИ

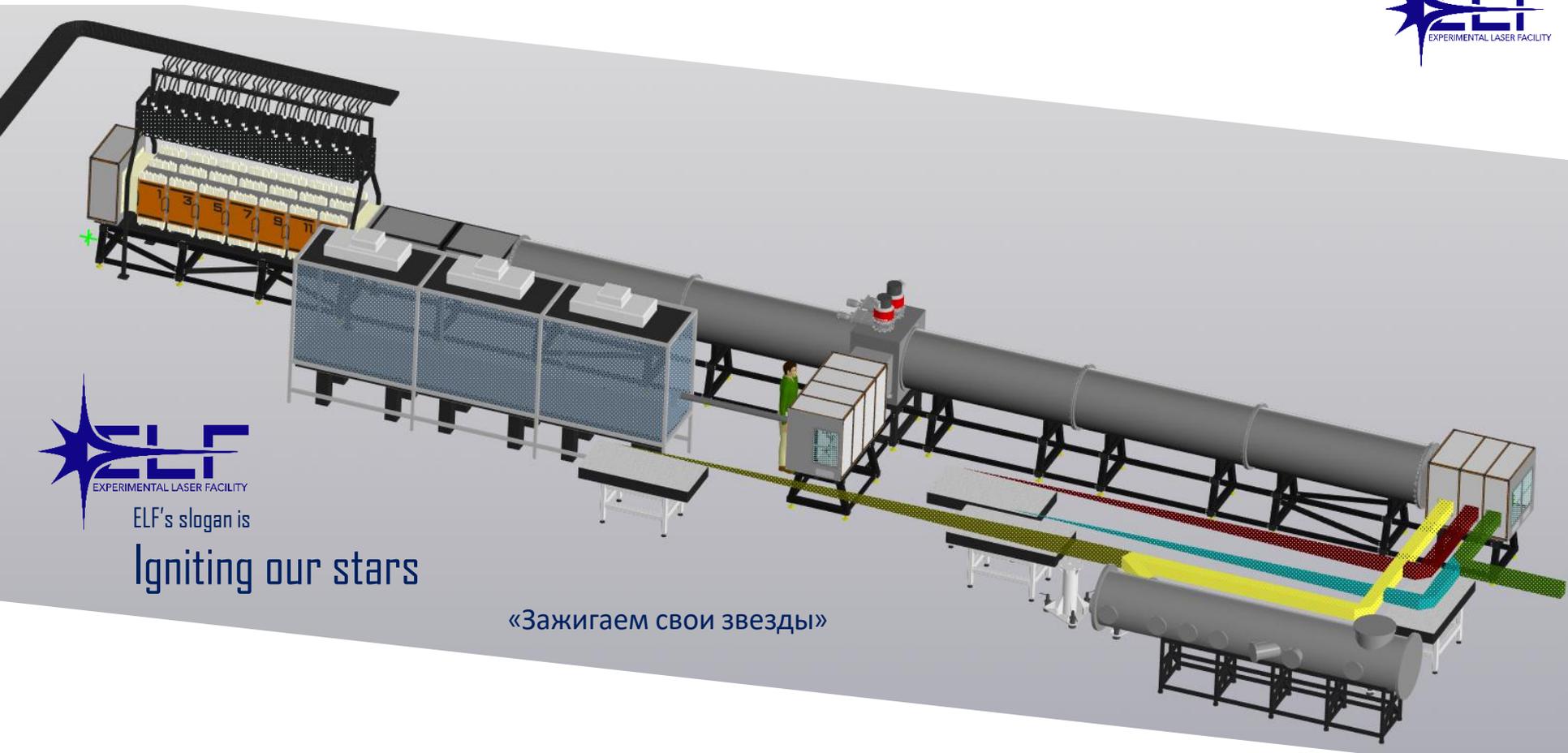
# Общий вид помещений



Общая площадь: 800 м<sup>2</sup>  
Чистые помещения: 300 м<sup>2</sup>

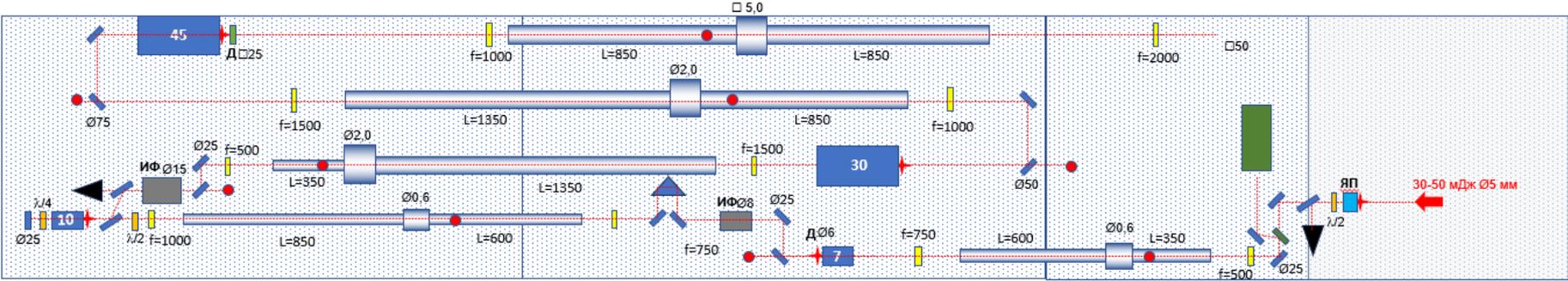
# Трансформация экспериментального зала







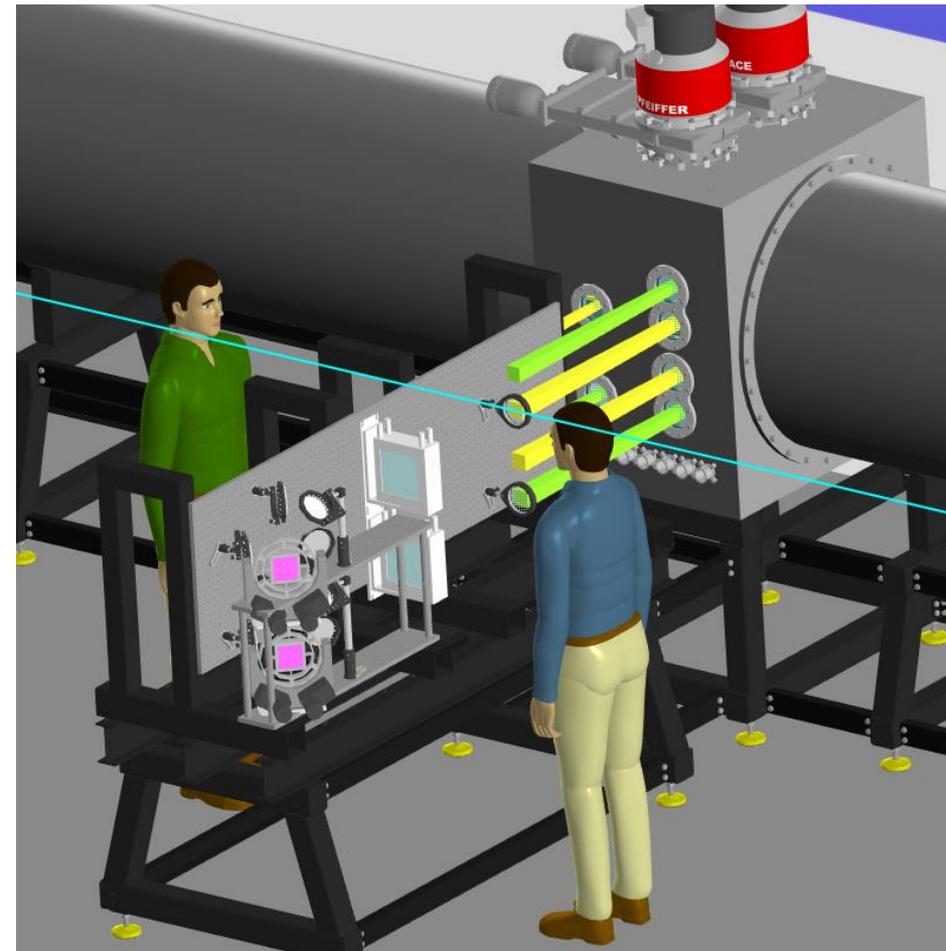
# Система предварительного усиления



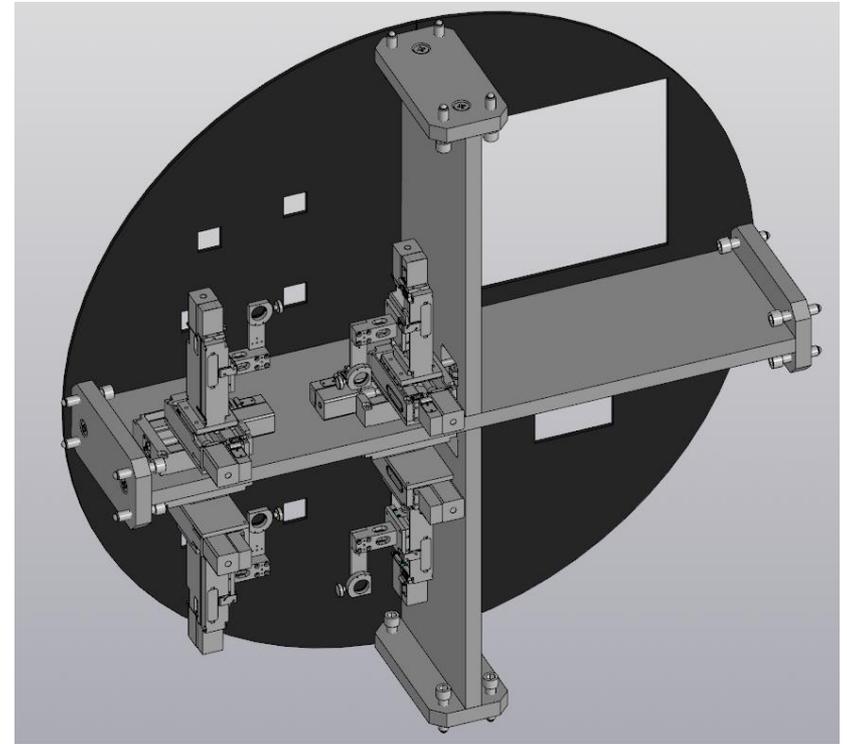
16.03.2025



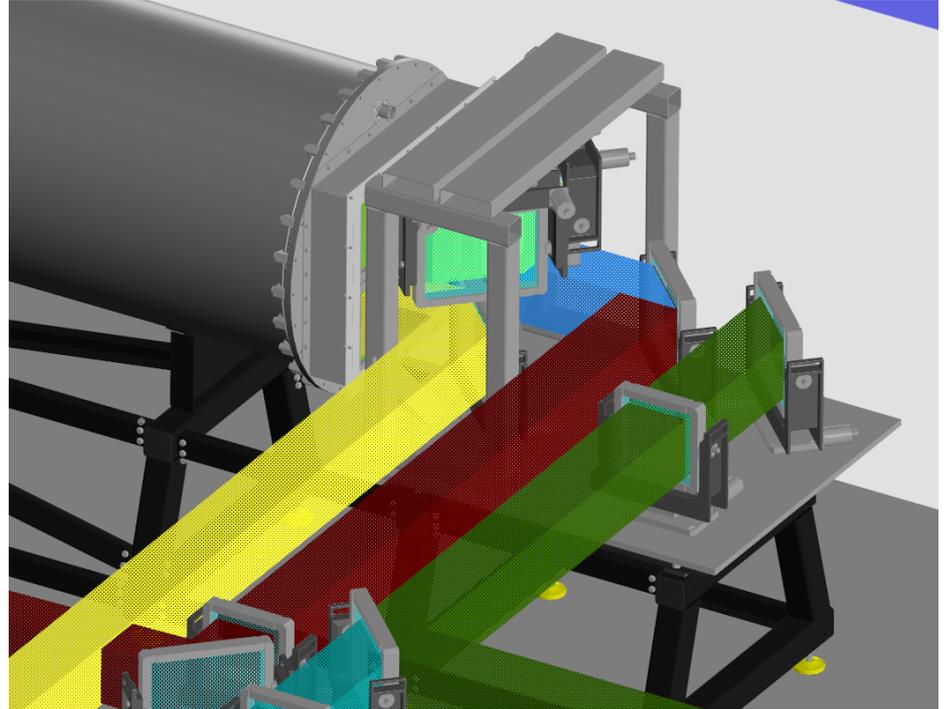
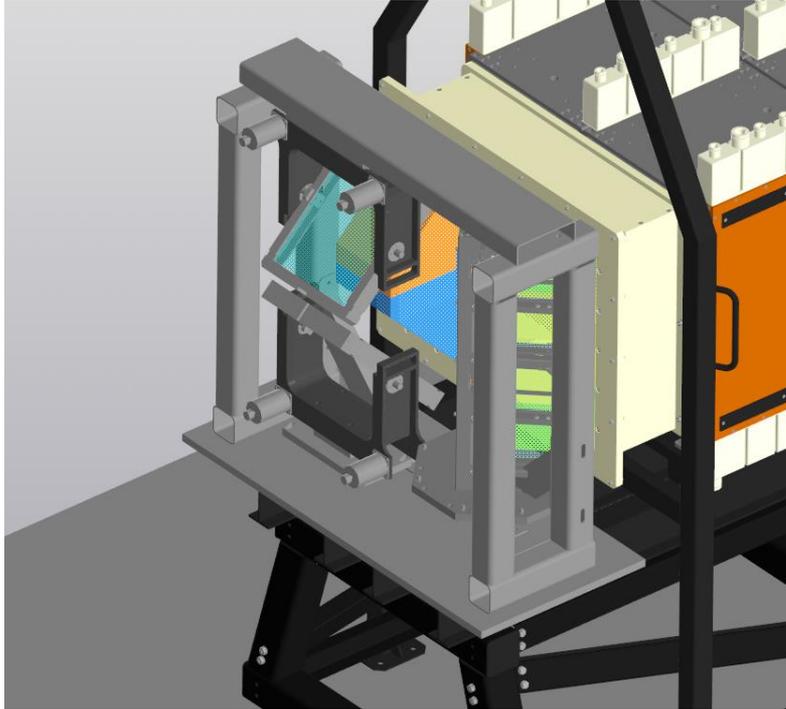
# Реверсор



# Дифрагменный узел

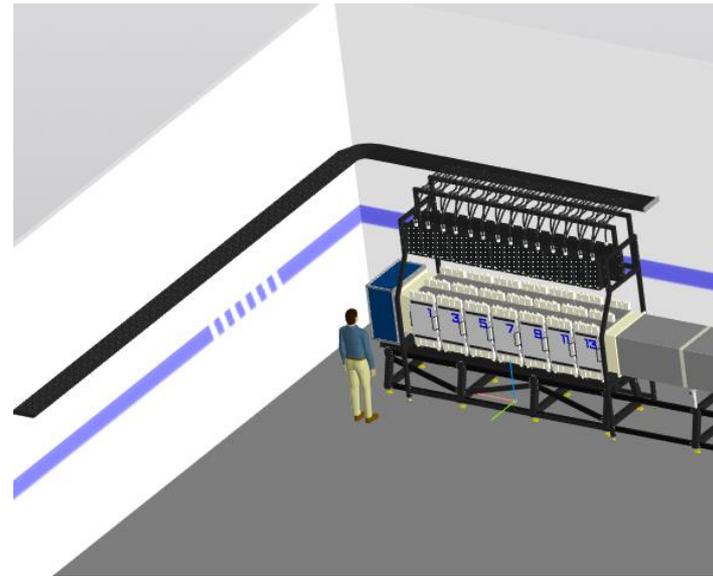
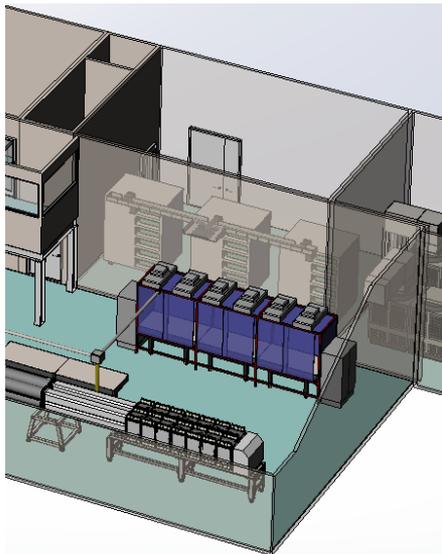


# Концевые отсеки



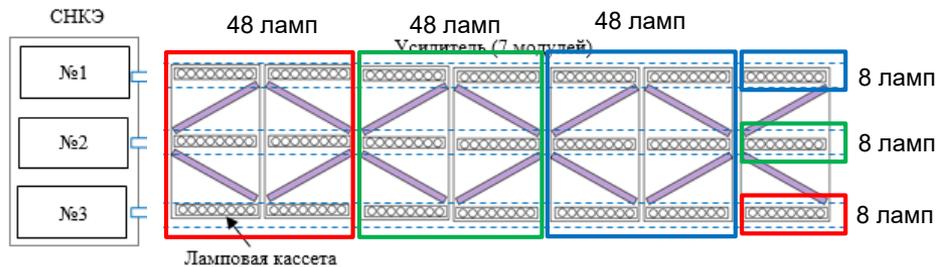
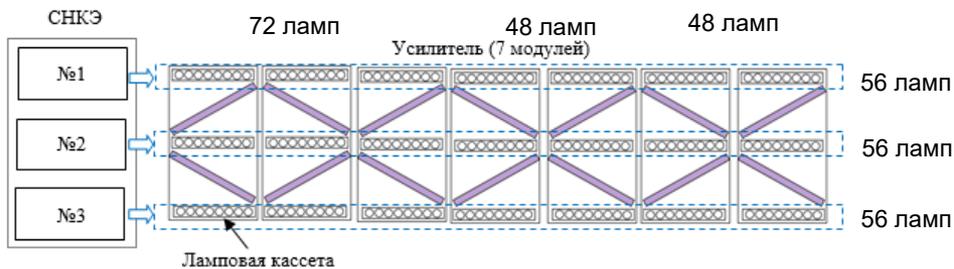


# СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ И КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОЙ НЕОДИМОВОЙ УСТАНОВКИ «ЭЛЬФ»



Основные характеристики импульсных ламп накачки типа ИМП-24/590

Внутренний диаметр кварцевой колбы лампы, см	2,4
Длина разрядного промежутка лампы, см	59
Давление ксенона в лампе, Торр	150
Рабочая энергия при $f=0,2-0,25$ , кДж	6,8-8,5
Количество ламп в кассете, шт.	8
Общее количество ламп в установке	168



PALS



Phelix



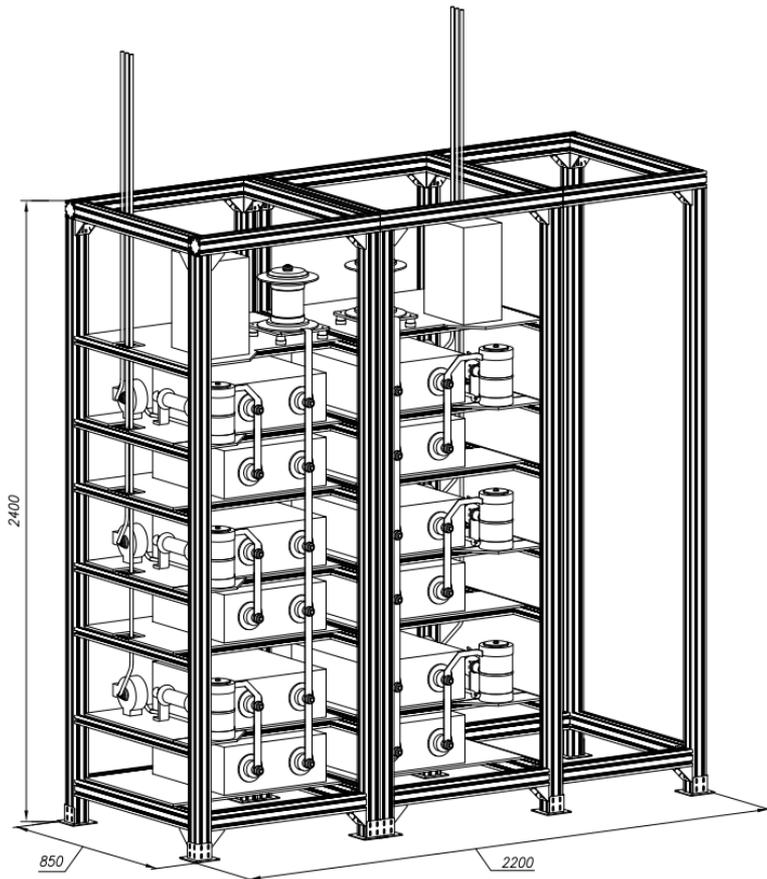
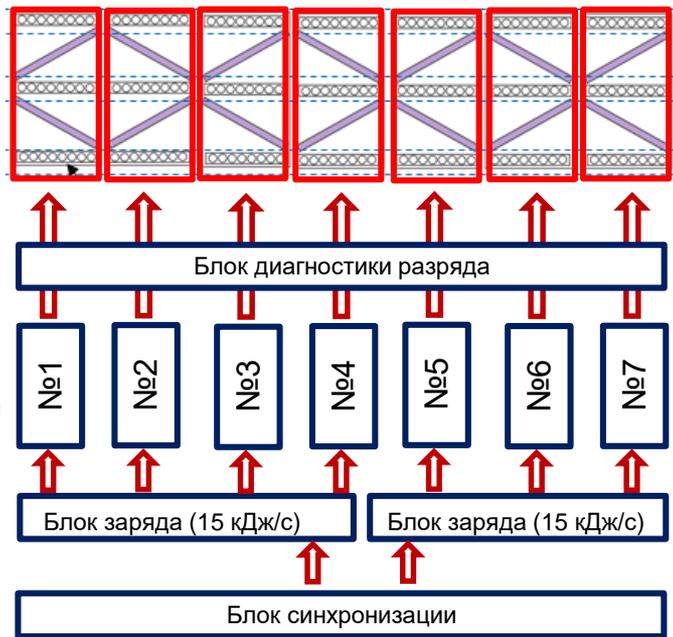


ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»



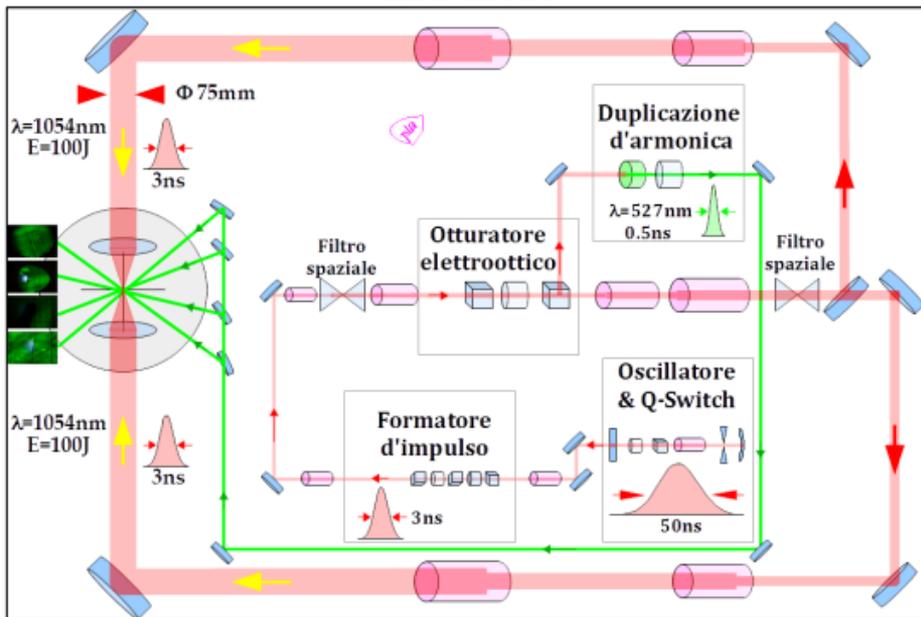
ИПФ РАН

Блоки накопления и коммутации энергии



ДИАГНОСТИКИ

### Laser scheme



### --- Available permanent diagnostics, routinely used ---

Visible interferometry	2 channels * Nomarski interferometer
Shadowgraphy	2 channels
Measurement of reflected and transmitted light	By fast calibrated photodiodes
Visible streak cameras	2, high sensitivity, 1.5 ps time resolution
Optical spectrometers	2 = 1 at very high resolution and 1 at large spectral window. The first is also equipped with an optical streak camera, for fast time-resolved high resolution spectrometry
X-ray streak cameras	1 with 100 ps time resolution
X-ray diode detectors	8, each with different filter
Time-Gated strip MCP	2, with 100 ps time resolution. One with 3 strips, one with 4
MCP for X-ray diagnostic imaging	1, with four pinholes with different filters
X-ray transmission grating	3 = 1 at 5000 lines per millimeter and 2 at 2000 lines per mm
Time-of-Flight Faraday cups	8, at different angles from target normal
Time-of Flight Diamond detectors	5 = 4 with high energy resolution (up to 6 MeV protons), 1 for high energy particles (up to 20 MeV protons)
Diamond Detector of large area	Polycrystalline Diamond detector with 15mmx15 mm detection area, equipped for EMP-polluted environments
Multilayer diamond structure	Multilayer structure of active fast diamond sensors equipped with different filters
Time-of-Flight Scintillator	1, BC408 fast plastic scintillator, large area (25 cm <sup>2</sup> ), equipped with fast photomultiplier
Thomson spectrometers	2 = 1 for low energy particles (5 keV-2 MeV protons); 1 for high energy ones (100 keV - 15 MeV protons). Optimized for EMP-polluted environments
Probes for EMP measurements	2 DDOT near field probes + 2 Dipolar antennas + 1 Super-wideband antenna + 3 Electro-Optical probes (high sensitivity (with LNAs) and low sensitivity for fields > MV/m; 1 resistive current probe setup.
Multi-channel electro-optical sensors	A two channels electro-optical sensing structure for the electric fields up to 1 GHz (with amplifier: high sensitivity) and up to a few GHz without (low sensitivity, for high fields). Calibrated EO probes with transversal or longitudinal sensing direction
CR39 detectors	Detectors of different sizes, equipment for developing and accurate readout
Imaging plate diagnostics	TR, MS, SR, ND types, with scanner and eraser
Confocal microscope for measurement of craters left on targets	1, with high optical resolution, reconstruction of 3D crater profile

### --- Diagnostics in development ---

Visar	Two high-dynamic range streak cameras are on site and fully operating. A CW large coherence length ruby laser is on site, on repair. VISAR setup to be built
Time-of Flight Scintillator	With large area and fast response. Improved sensitivity
Electron Spectrometers	Magnetostatic spectrometer for electrons in the 1-200 keV
Scattered light	An array of several optical fibers to be equipped with lenses pointing toward several directions to the target normal

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**