

100-летие со дня рождения Н.Г. Басова

ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ: ОТ ИДЕИ ДО СЕГОДНЯШНИХ ДНЕЙ

С.Ю. ГУСЬКОВ

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

X Конгресс российской технологической платформы

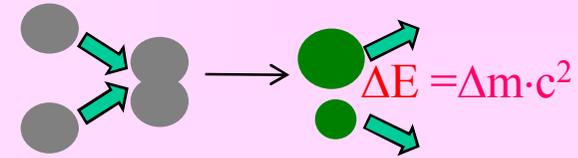
**«Инновационные лазерные, оптические и
оптоэлектронные технологии – фотоника»**

30 марта 2021 г.

Лазерный термоядерный синтез – управляемая реакция синтеза при создании и инерциальном удержании плазмы за счёт быстрого нагрева мощным импульсом излучения лазера

Реакция синтеза:

Взаимодействие двух ядер с образованием более тяжёлого ядра и выделением энергии по закону Эйнштейна $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$



Необходимо:

1. Сблизить ядра на расстояние около 10^{-13} см, на котором сила ядерного взаимодействия ядер начинает превосходить силу их кулоновского отталкивания;
2. Для этого ядра должны быть ускорены по отношению друг к другу до огромных скоростей около **1000 км/с**, т.е. нагреты до температуры в **сотни млн. градусов**;
3. Обеспечить как можно большую плотность плазмы и как можно большее время её существования в плотном и нагретом состоянии.

Особенности:

Чем меньше заряд ядер, тем меньше скорость, до которой их надо разогнать.

Наименьший заряд +1 имеют изотопы водорода – дейтерий и тритий.

Для них минимальная температура нагрева – около **100 млн. градусов (10 кэВ)**



Магнитное удержание:

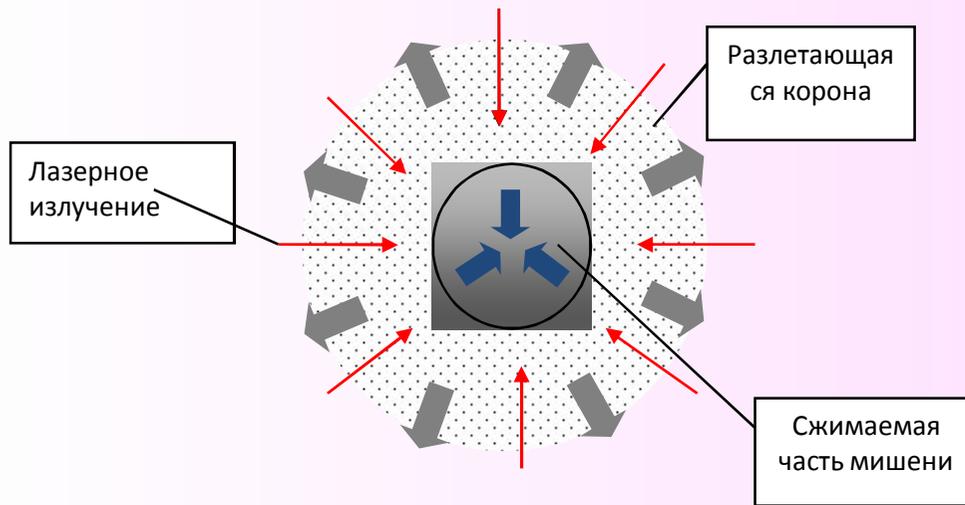
температура - около **100 млн. градусов**;
плотность - около **10^{14} ядер/см³**;
время удержания – **секунды**.

Инерциальное удержание

температура - около **100 млн. градусов**;
плотность - около **10^{25} ядер/см³**;
время удержания – **10^{-11} секунды**.

Лазерный термоядерный синтез: общая концепция

Лазерный нагрев. Образование давления. Ускорение к центру и сжатие мишени.

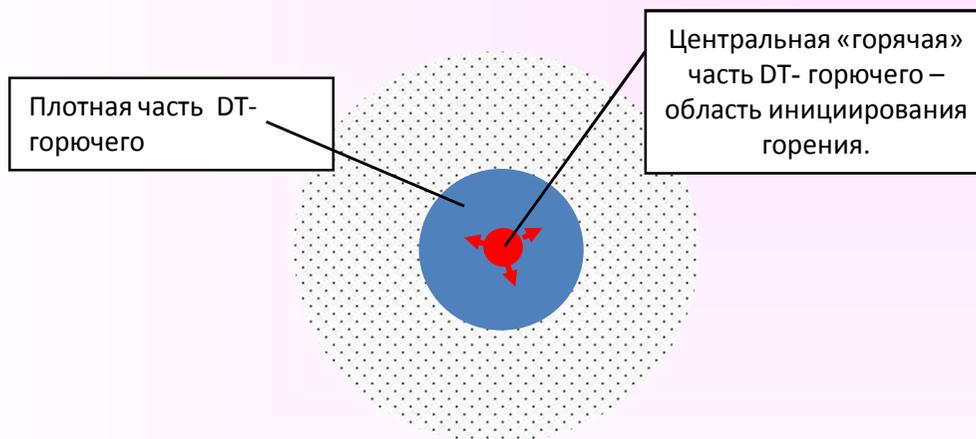


Лазер:
1-2 МДж, 200-400 ТВТ, 10-15 нс.

Мишень:
радиус – 1-2 мм; масса - 2-3 мг.

Сжатие:
давление: около 10^8 атмосфер;
скорость к центру: около 300 км/сек;
время сжатия: около 10 нс (10^{-8} с).

Горение мишени – термоядерный микровзрыв



Температура DT плазмы:
около 100 млн. градусов;

Плотность:
около 10^{25} ядер/см³;

Давление:
около 10^{12} атмосфер

Время удержания и горения:
0.01 нс (10^{-11} секунды).

Коэффициент усиления = $\frac{\text{Энергия реакций синтеза}}{\text{Энергия, затраченная на создание и удержание плазмы}}$

ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ: ИСТОРИЯ

ИДЕЯ: Н.Г. БАСОВ и О.Н. КРОХИН.

1961 г. Выступление Н.Г. Басова на Президиуме Академии наук СССР.

1964 г. Статья Н.Г. Басова и О.Н. Крохина в ЖЭТФ.

1968 г. ПЕРВЫЕ НЕЙТРОНЫ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА ИЗ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ.

Н.Г. Басов, С.Д. Захаров, Н.Г. Крюков, Ю.В. Сенатский, С.В. Чекалин.

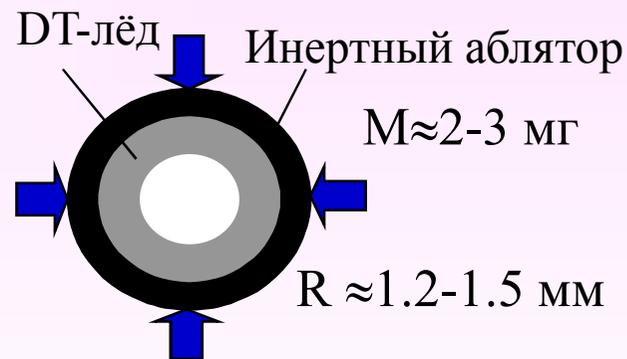
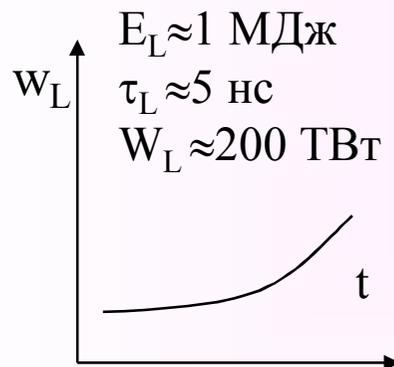
Регистрация нейтронов DD-реакции в экспериментах по облучению мишени из дейтерированного лития (LiD) лазерным импульсом с интенсивностью около 10^{12} Вт/см², и длительностью около 10 пс.

70-е ГОДЫ.

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ЛТС: СФЕРИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ,
НИЗКОЭНТОПИЙНОЕ СЖАТИЕ, ИСКРОВОЕ ЗАЖИГАНИЕ.
ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА.

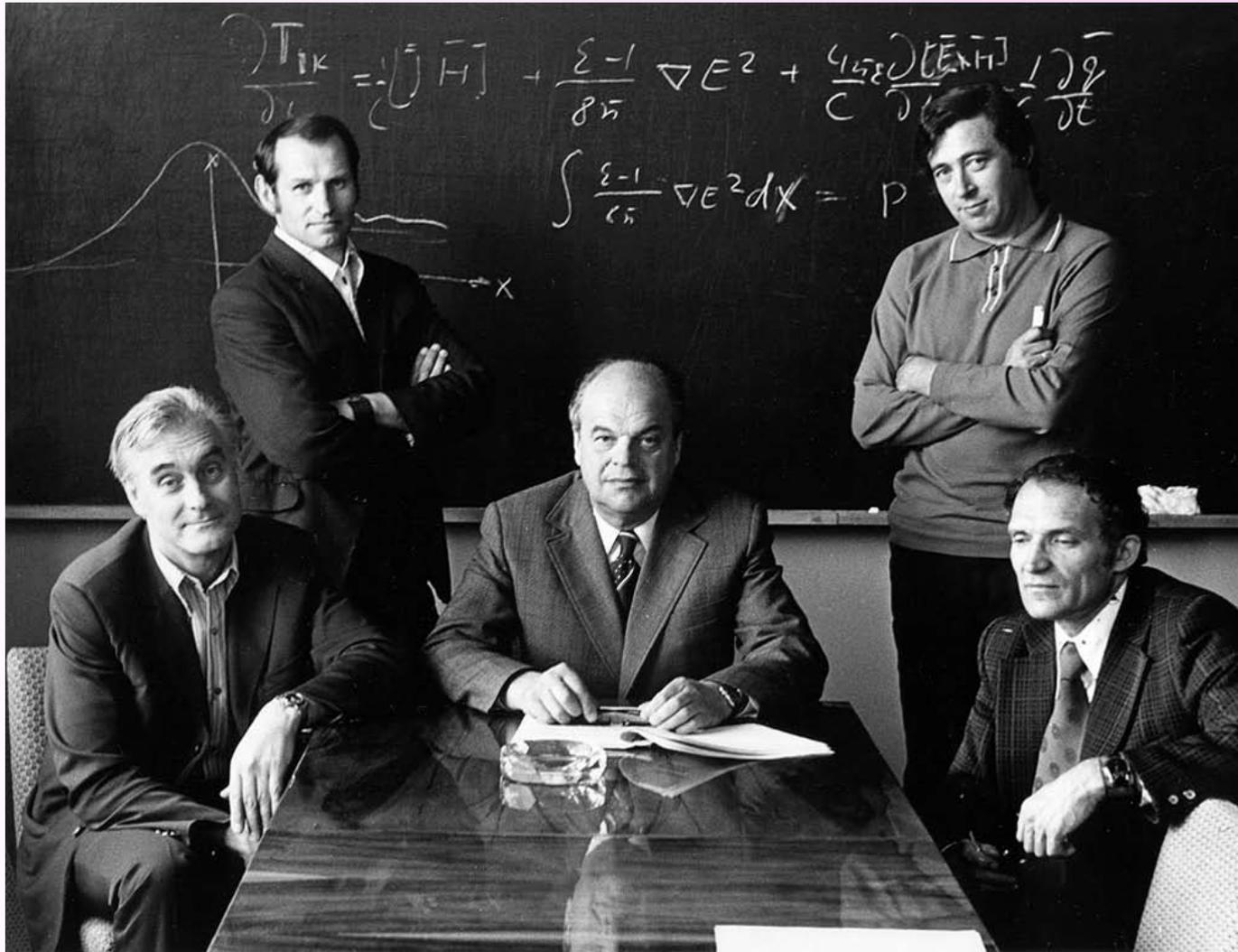
Н.Г. Басов, О.Н. Крохин, Ю.В. Афанасьев, В.Б. Розанов:
Сжатие мишени в виде тонкой сферической оболочки под действием
лазерного импульса с профилированной во времени мощностью .



Искровое зажигание



Усиление по энергии 100



Слева на право:

О.Н. Крохин, Е.Г. Гамалий, Н.Г. Басов, Ю.В. Афанасьев, В.Б. Розанов

70-80 гг. ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СФЕРИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ.

70-е годы. Установка «КАЛЬМАР» :

9 пучков излучения основной гармоники Nd-лазера с энергией 100-200 Дж, при длительности импульса около 3 нс.

Первые в мире эксперименты со сферическими мишенями.

80-е годы. Установка «ДЕЛЬФИН» для многопучкового облучения:

216 пучков излучения основной гармоники Nd-лазера с энергией 3-5 кДж.

О.Н. Крохин, Г.В. Склизков, С.И. Федотов, А.С. Шиканов, Ю.А. Захаренков, А.А. Рупасов, Н.Н. Зорев, А.А. Кологривов, Ю.А. Михайлов и др.

Эксперименты со стеклянными и полистирольными оболочками, заполненными D₂-газом (радиус - 50-300 мкм, толщина – 2-3 мкм) :

! поглощение лазерного излучения – около 70%;

! ускоряющее давление - около 10⁷ атмосфер;

! скорость полета оболочки к центру – свыше 300 км/с;

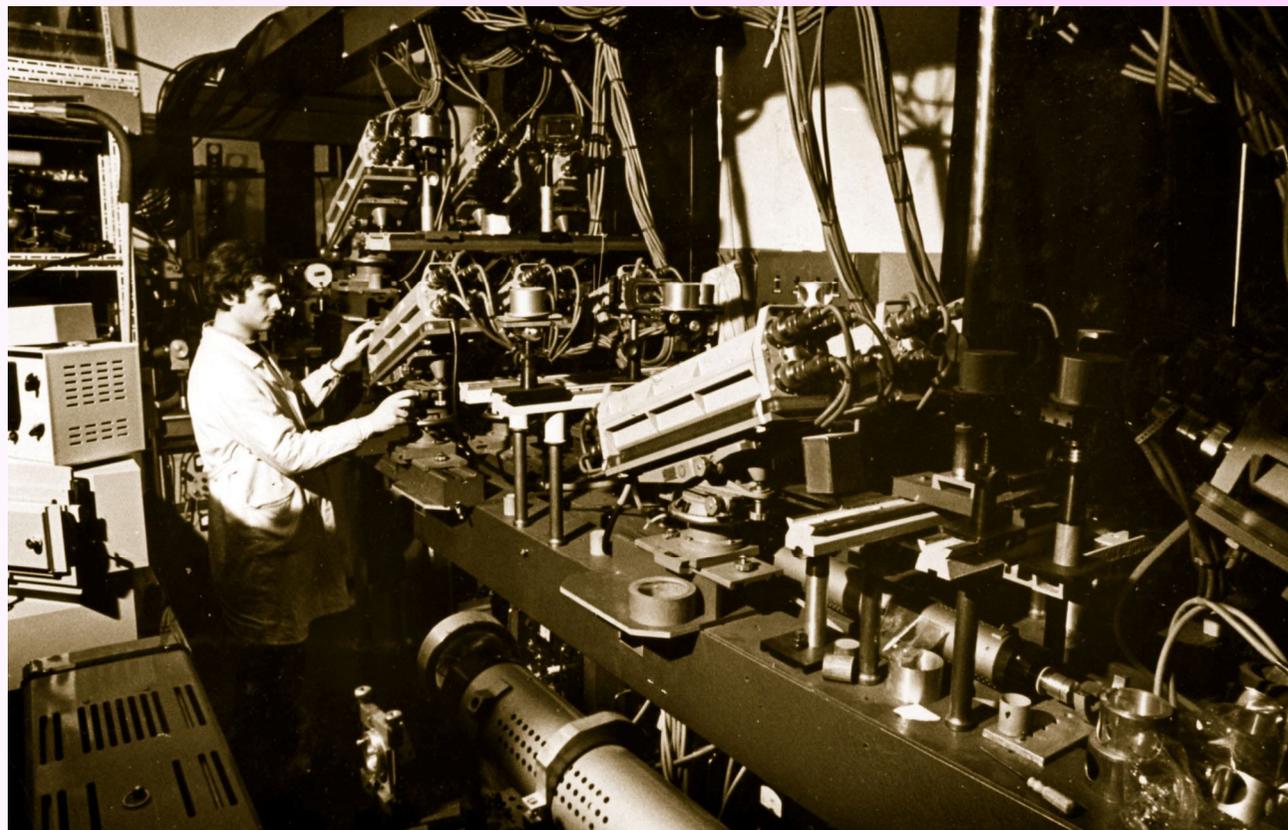
! объемное сжатие плазмы - свыше 10³;

! выход DD-нейтронов – более 10⁶ частиц за выстрел.

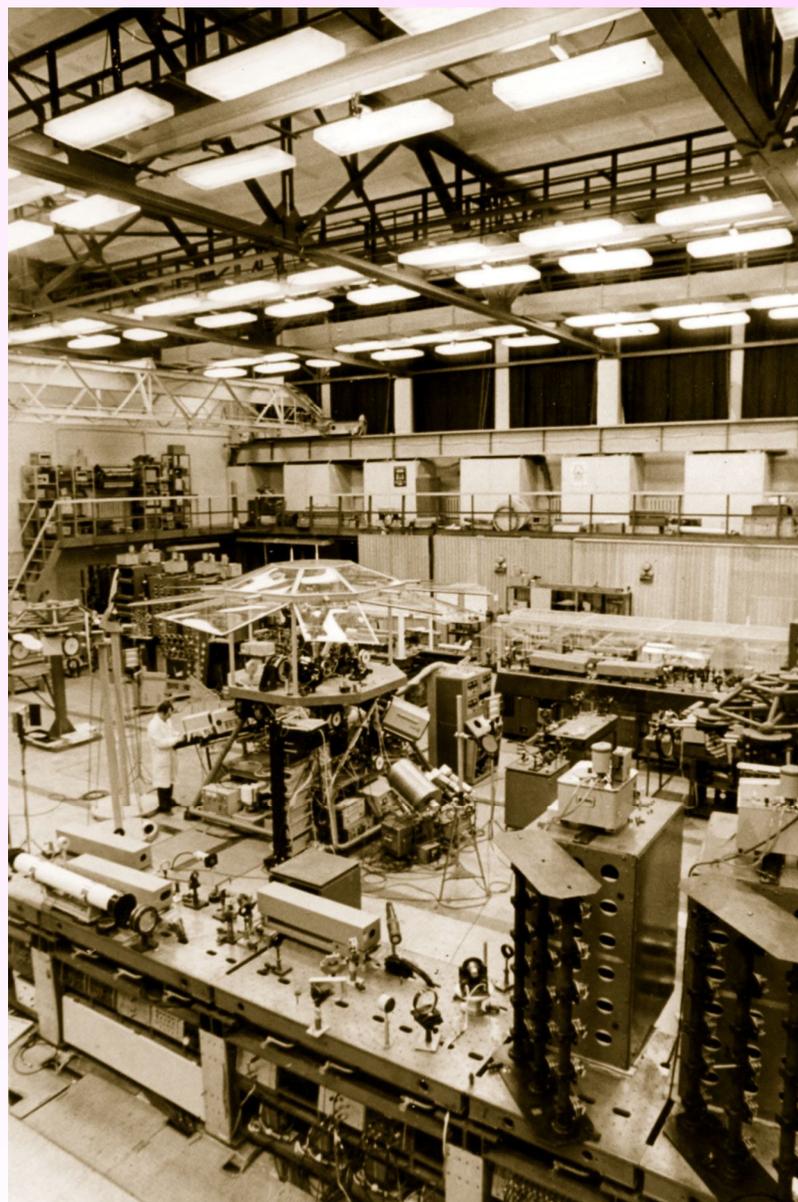
Физика и технология изготовления микрооболочек.

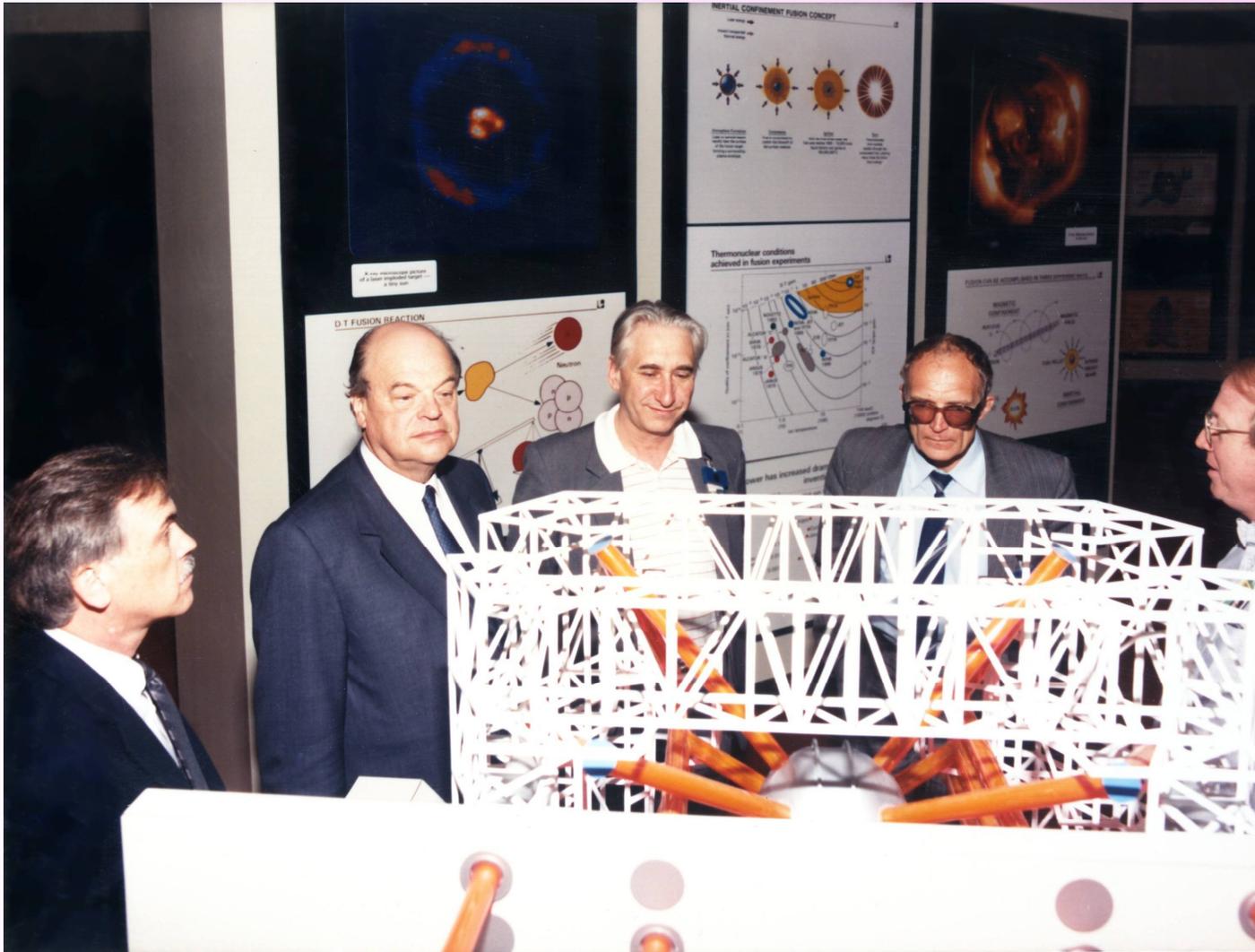
Ю.А. Меркульев, Н.Г. Борисенко, Е.Р. Корешева, А.И. Никитенко и др.

9-ти пучковая установка «КАЛЬМАР»



МНОГОПУЧКОВАЯ УСТАНОВКА «ДЕЛЬФИН»





Визит в Ливерморскую лабораторию (США).

В центре, слева на право: Н.Г. Басов, Г.В. Склизков, В.Б. Розанов

90-е ГОДЫ: ПОИСК АЛЬТЕРНАТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ.

Н.Г. Басов, Л.П. Феокистов, В.Б. Розанов, Е.Н. Аврорин, Л.Д. Рябев, и др.
(ФИАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ).

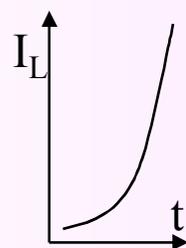
Концепция гибридного реактора синтез-деление:

высокий коэффициент усиления (до 100) в подкритическом ядерном blankets при иницировании реакции деления нейтронами лазерного термоядерного блока.

Н.Г. Басов, С.Ю. Гуськов, Л.П. Феокистов (ФИАН). Быстрое зажигание.
Разделение процессов сжатия и нагрева плазмы при использовании двух драйверов.



«Медленное» сжатие
до плотности 300 – 500 г/см³



Лазер:

$$E_L \approx 500 \text{ кДж,}$$

$$\tau \approx 15 \text{ нс,}$$

$$I_{\max} \approx 10^{13} \text{ Вт/см}^2$$

Быстрый нагрев до $T \approx 10$ кэВ

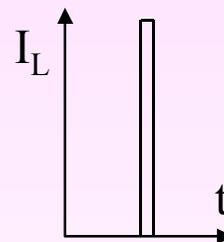
Пучок электронов

или ионов:

$$E_B = (20-30) \text{ кДж,}$$

$$\tau = 20-40 \text{ пс,}$$

$$I \approx 10^{18} \text{ Вт/см}^2$$



С.Б. Кормер, Г.А. Кириллов, Н.В. Жидков и др. (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

Мощный йодный лазер «ИСКРА-5»: энергия 25 кДж, $\lambda = 1,315$ мкм, 12- пучков.

Непрямое облучение мишени лазерно-индуцированным рентгеновским излучением:

! 10^{10} нейтронов DD-реакции;

! радиационная температура около 200 эВ.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛТС

1. NIF (Ливерморская лаборатория, США) –

действующая, эксперименты по непрямому облучению:

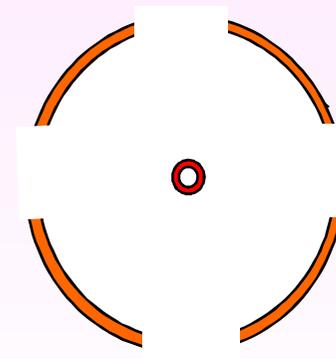
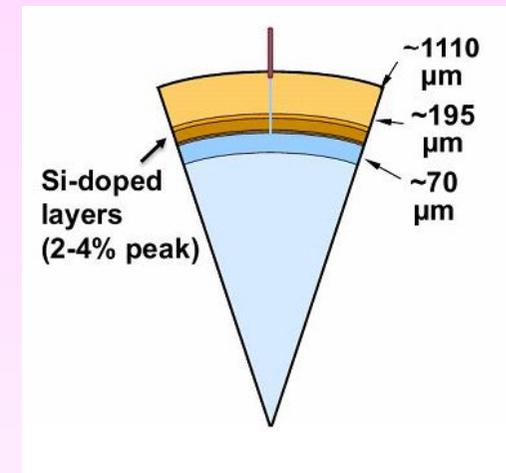
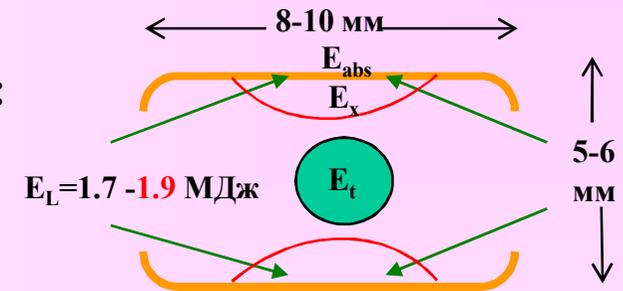
- энергия $E_L \approx 1.7-1.9$ МДж, 3-я гармоника Nd-лазера;
- профилированный импульс, длительность 10-15 нс;
 - пиковая мощность около 500 ТВт;
 - **цилиндрический конвертор**;
- энергия рентгеновского излучения на мишень
 $E_t \approx 0.1 \cdot E_L \approx 150-180$ кДж.

**Рекордный результат с энергией 1.93 МДж (2022.08.08):
 $N=4.8 \cdot 10^{17}$ - 1.35 МДж (70% от лазерной энергии, в 6 раз больше, чем энергия, вложенная в мишень)**

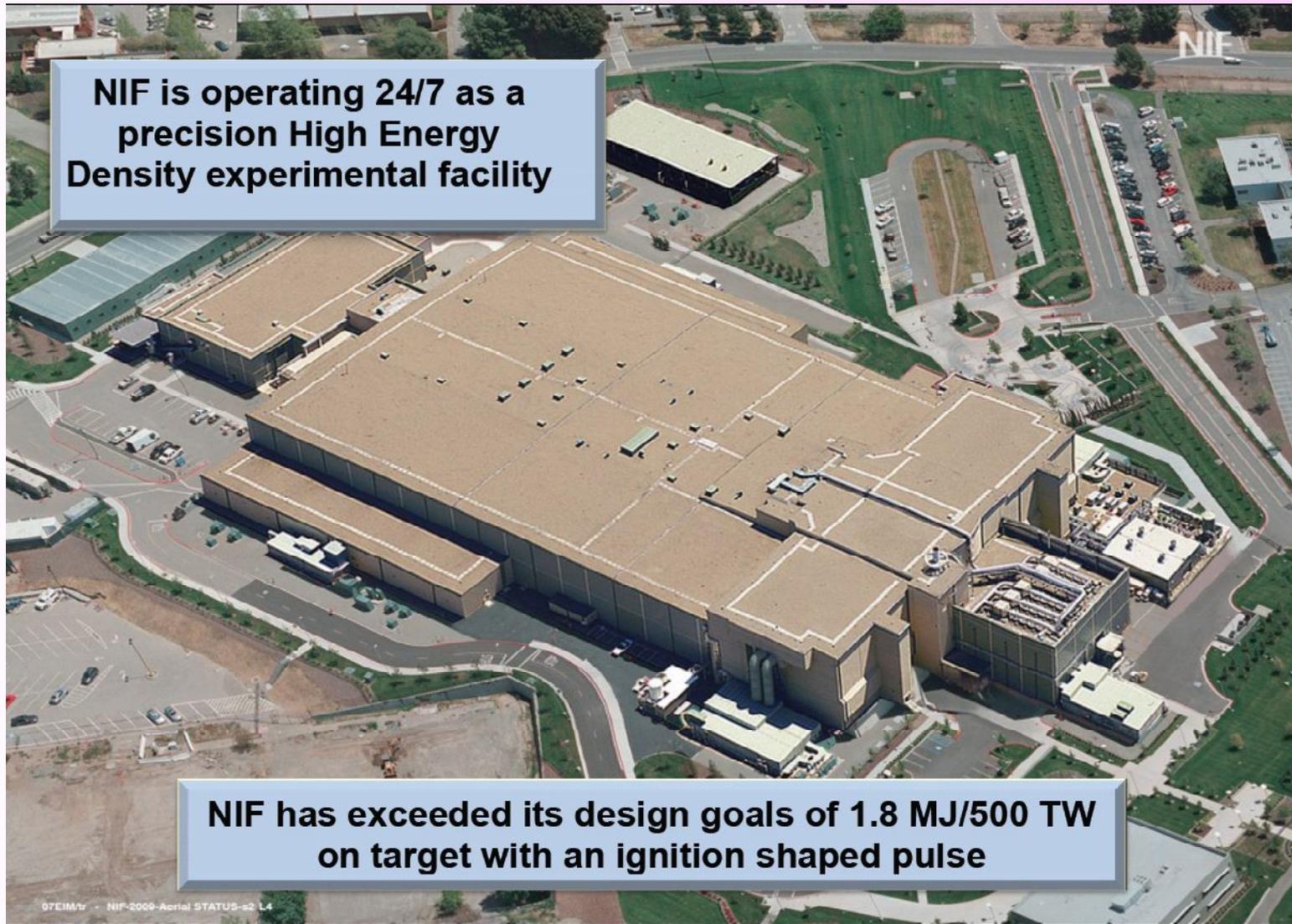
2. LMJ (Комиссариат по атомной энергии, Франция) – строящаяся, установка-близнец NIF.

3. Мегаджоульная установка российского проекта (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров) не прямое и прямое облучение:

- энергия – 2.6-2.8 МДж, 2-я гармоника Nd-лазера;**
- профилированный импульс, длительность 10-15 нс;
 - пиковая мощность около 500 ТВт;
 - **сферический конвертор.**
- Введение в эксплуатацию -2028 г.



Установка NIF (LLNL, США): 192 пучка, 1.8 МДж (λ_3), $\tau=10-20$ нс, $W_{\text{peak}} = 500$ TW. 3.8 млрд. \$



Мегаджоульная установка для ЛТС РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) (из доклада С.А. Белькова на Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС в 2021 г.)

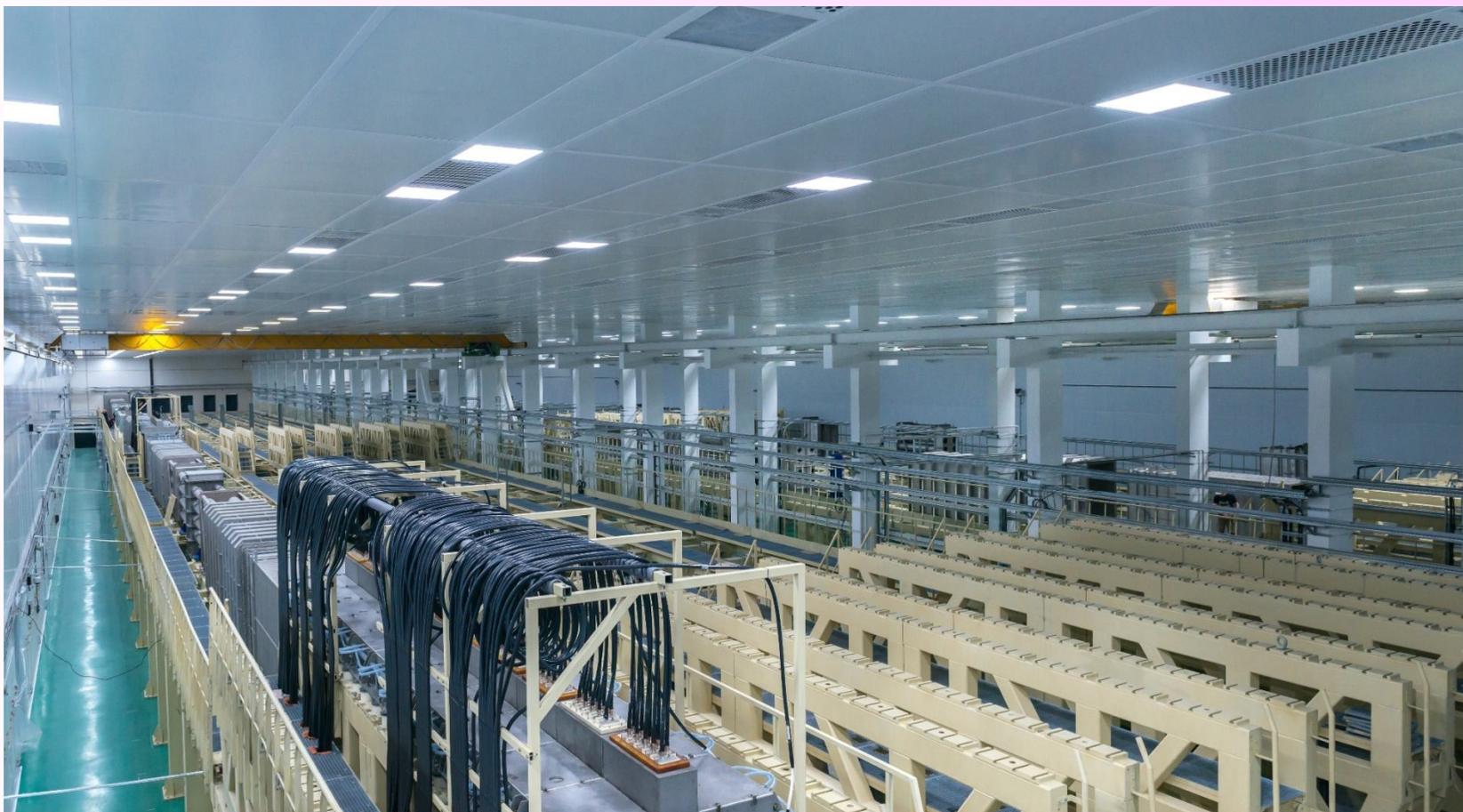
Фундаментальные исследования поведения веществ при плотностях в 100 раз
превышающих твердотельную и температурах в сотни миллионов градусов



- Отработаны отечественные технологии создания составных частей.
- Здание для размещения установки сдано в эксплуатацию.
- Завершены монтаж и вакуумные испытания камер взаимодействия на месте эксплуатации.
- Первый лазерный модуль (8 каналов) введен в опытную эксплуатацию. Проведены его предварительные испытания.
- Запущена мишенная фабрика.

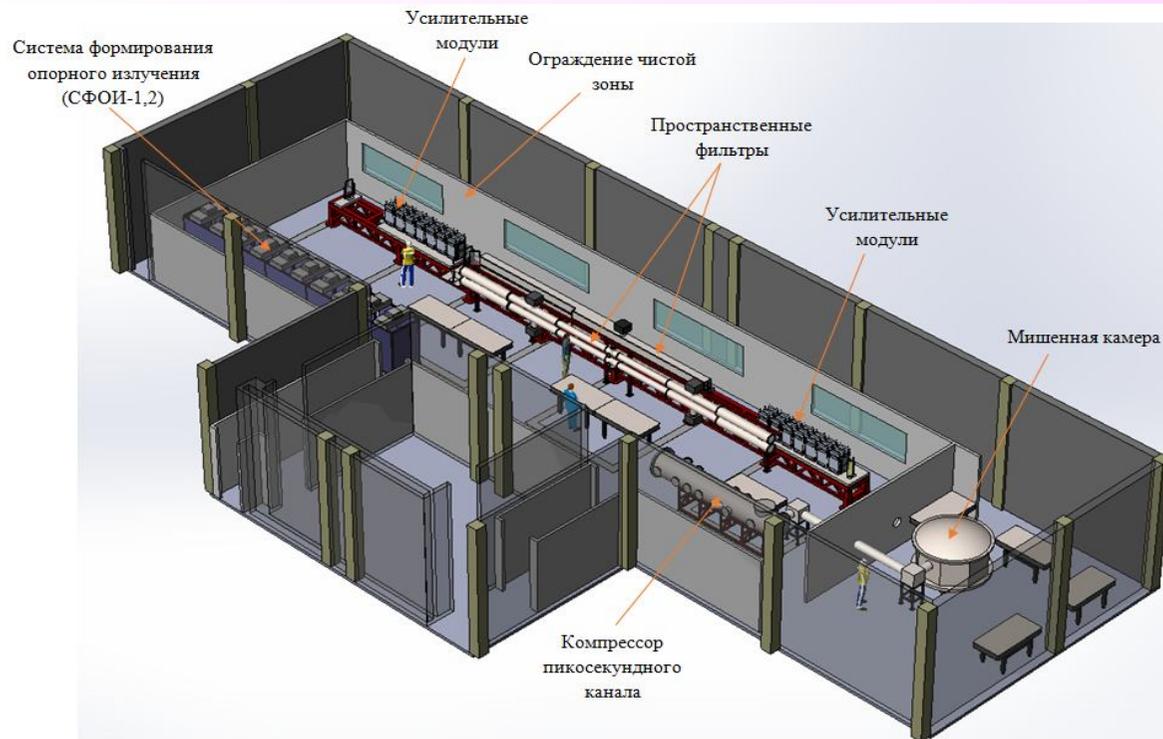


Лазерный модуль
(из доклада С.А. Белькова на Международной (Звенигородской)
конференции по физике плазмы и УТС в 2021 г.)



**Первый 8-ми канальный модуль введен в опытную эксплуатацию.
Проведены его предварительные испытания, которые показали соответствие
полученных параметров требования ТЗ.**

Проект «Эльф», НИЯУ-МИФИ, г. Москва (из доклада С.А. Белькова на Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС в 2021 г.)



- ✓ уравнения состояний материалов;
- ✓ упруго-пластические свойства веществ;
- ✓ гидродинамические неустойчивости;
- ✓ нелокальный перенос тепла;
- ✓ перенос излучения в плазме;
- ✓ турбулентное перемешивание;
- ✓ противодействие астероидной опасности;
- ✓ разработка измерительных и диагностических систем.

Длительность импульса, с	$(1 - 4) \cdot 10^{-9}$ канал 1 (НС)	$1 \cdot 10^{-12}$ канал 2 (ПС)	$4 \cdot 10^{-14}$ канал 2 (ФС)
Энергия в импульсе, Дж (1ω)	до 7000	300	20
Плотность мощности, Вт/см ²	10^{16}	10^{20}	10^{20}

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФИАН

Развитие методов диагностики быстропротекающих лазер-плазменных процессов.

Эксперименты на Nd-лазере «Канал-2» (100 Дж, 3 нс) по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом.

Теория и численное моделирование гидродинамических, кинетических и ядерных процессов в мишенях лазерного термоядерного синтеза.

Развитие физических и технологических основ производства мишеней для экспериментов по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом.

Участие в крупнейших национальных проектах в области лазерного термоядерного синтеза на мегаджоульном лазере РФЯЦ-ВНИИЭФ и килоджоульном лазере ЭЛЬФ НИЯУ-МИФИ