



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Мощные лазеры для исследований в области физики высокой плотности энергии

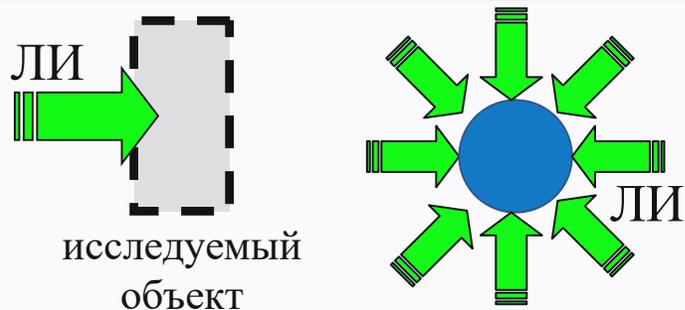
Гнутов Артем Сергеевич
Бельков Сергей Аркадьевич



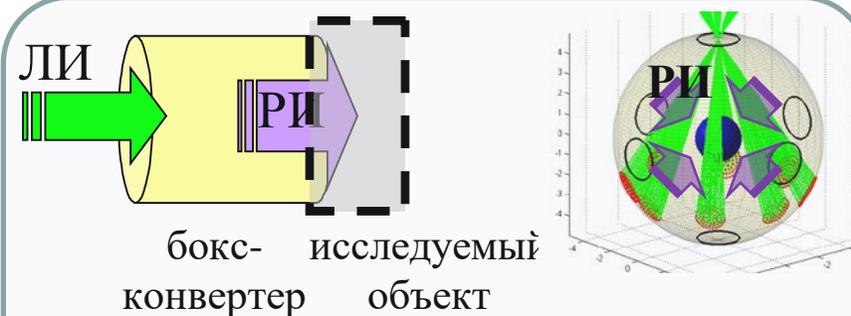
Особенности экспериментов на мощных лазерных установках

Возможность установки по созданию колоссальной плотности энергии в небольшом объеме позволяет проводить исследования свойств веществ и процессов при высокой плотности энергии, с параметрами, недостижимыми другими лабораторными методами

Прямое и не прямое воздействие ЛИ



- Высокая эффективность использования источника (доля поглощенной энергии ЛИ до ~90%);
- Однородность воздействия определяется качеством и количеством лазерных пучков;
- Неравновесное состояние лазерной плазмы, рождение вторичных излучений (РИ, ЭМИ, БЗЧ).



- Сниженная энергетика воздействия (эффективность конверсии ЛИ в РИ составляет ~50%);
- Существенно более однородное воздействие на образец;
- Процесс может быть описан в рамках приближения ЛТР, равновесный спектр РИ (воздействие на образец описывается одним параметром $T_{РИ}$)

Параметры воздействий

Лазерное
излучение

энергия до 2.8 МДж
профилированный по времени
импульс
длительность 3 ÷ 30 нс
характерный размер пятна $\varnothing 500$ мкм

Рентгеновское
излучение

температура до 300 эВ
профилированный лазером импульс
характерные размеры области $\varnothing 2 \div 10$ мм

Вторичные
излучения

магнитные поля ~МГц
жесткий линейчатый РИ ω ~кэВ
БЗЧ ω ~10 ÷ 50кэВ
нейтроны до 10^{15} шт

Направления экспериментальных исследований

Исследования свойств веществ в экстремальном состоянии:

Атомная физика: конфигурация атомных оболочек; сечения атомных переходов; отработка квантомеханических моделей и кодов

Уравнения состояний: ударноволновые стационарный, нестационарный и изоэнтропические режимы нагружения; давления до 100Мбар в плоском и до Гбар в сферическом нагружении

Пробеги излучения: средние и спектральные данные в кэВ-ном диапазоне энергий с разрешением \sim эВ; поглощение в линиях, фотопоглощение, тормозное поглощение.

Реология: динамическая прочность веществ, отколы при скоростях деформации $>10^7$ 1/сек; структура кристаллических решеток фаз многофазных веществ; скорости фазовых переходов

Направления экспериментальных исследований

Исследования процессов в экстремальном состоянии:

Взаимодействие ЛИ с плазмой, конверсия ЛИ в РИ

Перенос РИ в средах

Сложные гидродинамические течения, исследования гидродинамических неустойчивостей Р-Т, Р-М, К-Г

Турбулентные течения, в том числе в плазме

Неравновесные процессы в плазме: диапазон применимости ЛТР, кинетика ионных состояний, влияние на другие физ. процессы

Генерация вторичных излучений: ЖРИ, ЭМИ, БЗЧ

Отработка физических моделей и кодов

Направления экспериментальных исследований

Исследования в интересах энергетики будущего

(Инерциальный термоядерный синтез)

Возможны различные варианты мишеней и воздействий: мишень прямого облучения, сферическая и цилиндрическая мишени непрямого облучения, мишени новых конструкций

Определение условий достижения полномасштабного горения, оптимизация мишени и режимов воздействий невозможно без проведения численного моделирования с учетом всех значимых процессов

Необходимо проведение широкого спектра физических исследований из перечисленных ранее.

При достижении высокого нейтронного выхода возможна отработка некоторых вопросов практической реализации термоядерной энергетики и проведение сопровождающих экспериментов с использованием нейтронных потоков

**В 2022 году во РФЯЦ-ВНИИЭФ завершен 1 этап
создания мощной лазерной установки
мегаджоульной энергии**



Завершено строительство и введен в эксплуатацию комплекс зданий и сооружений для размещения установки

Технологическая пристройка

Лазерные залы

Камерный зал



Габариты основного здания - 322,5x67 м.
Высота камерного зала - 34 м, высота лазерных залов - 17,6 м.
Длина лазерного зала – 143 м.
Площадь застройки – 23 380 м²
Общая площадь – 65 376 м².
Строительный объём здания – 469 530 м³.
Чистые помещения – 25 750 м² (40% от общей площади).

Создана инженерная инфраструктура для обеспечения работы установки в полном объёме

Завершен монтаж 4 8-ми канальных модулей силового усилителя (МСУ), проведены ПИ и показано достижение параметров ТТЗ



РФАЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



Параметр
Количество лазерных каналов
Рабочая длина волны лазерного излучения (1ω) (нм)
Длина волны облучения мишени (2ω) (нм)
Максимальная энергия на длине волны 1ω (кДж/канал)
Коэффициент преобразования в 2ω
Расходимость (рад.)

ТТЗ	Факт
8	8
1053	1053
527	527
24	24,01
0,6	0,65
$5 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$

В камере взаимодействия каналы объединены в кластеры по 4 канала

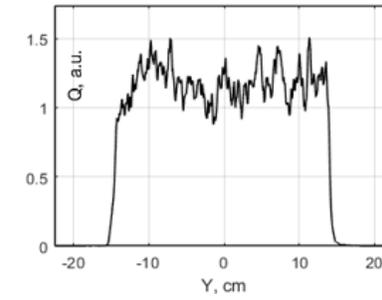
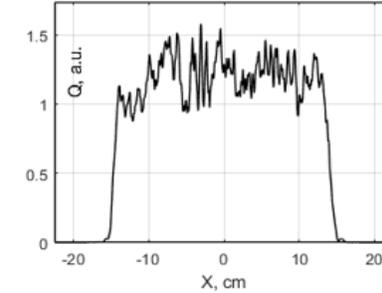
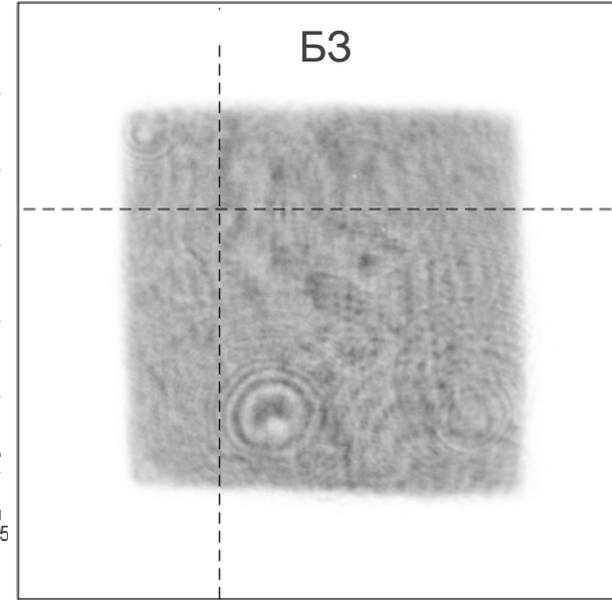
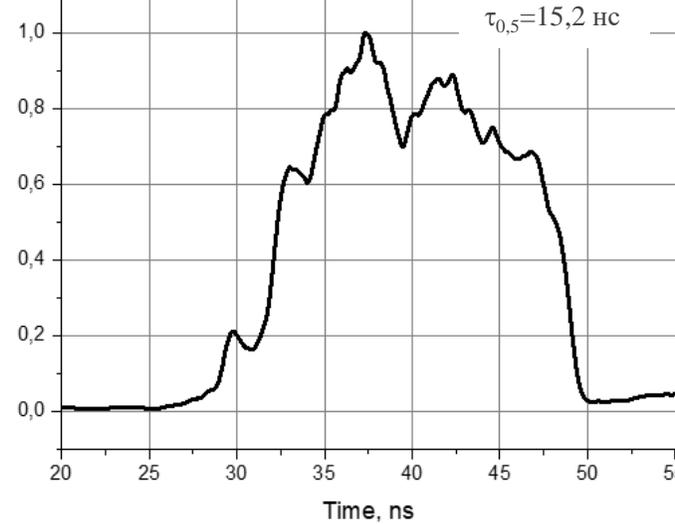
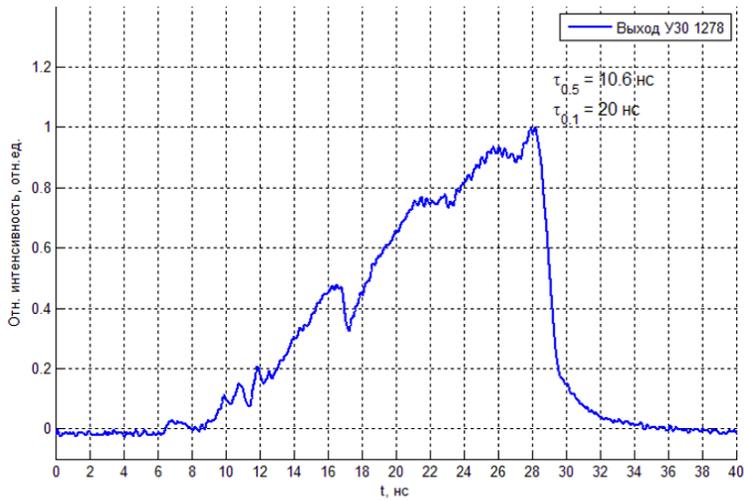
Состав модуля силового усилителя (МСУ)



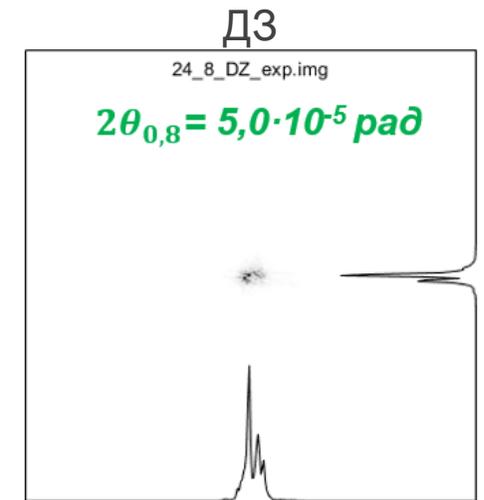
РКД МСУ присвоена литера «О»

Выходные параметры МСУ в одном из опытов

Временная форма лазерного импульса на выходе СФОИ (слева) и на выходе канала (справа)

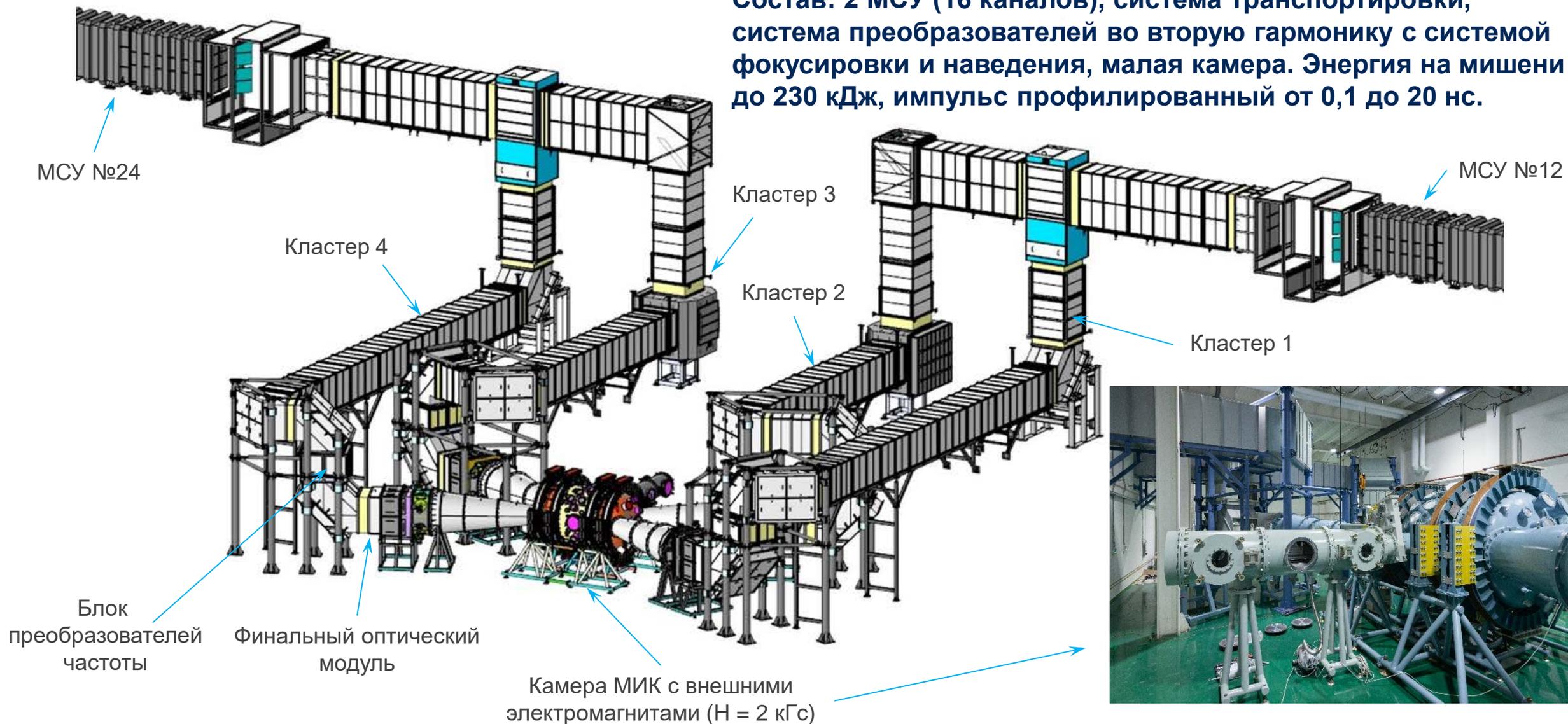


№ опыта, дата	№ канала	$E_{\text{ВХ}}$, мДж	$E_{\text{ВЫХ}}$, Дж	$\tau_{\text{СФОИ (0,5)}}$, нс	$\tau_{\text{ВЫХ (0,5)}}$, нс
131	1	119±6	25350±1270	10,6±0,1	15,2±0,1
	2	79,6±4	24750±1240		
	7	61,5±3	25040±1250		
	8	107,0±5	23850±1190		
	3	68,4±3,4	25280±1260	11,2±0,1	16,4±0,1
	4	110±5	25020±1250		
	5	101±5	24960±1250		
	6	72,1±3,6	24110±1200		

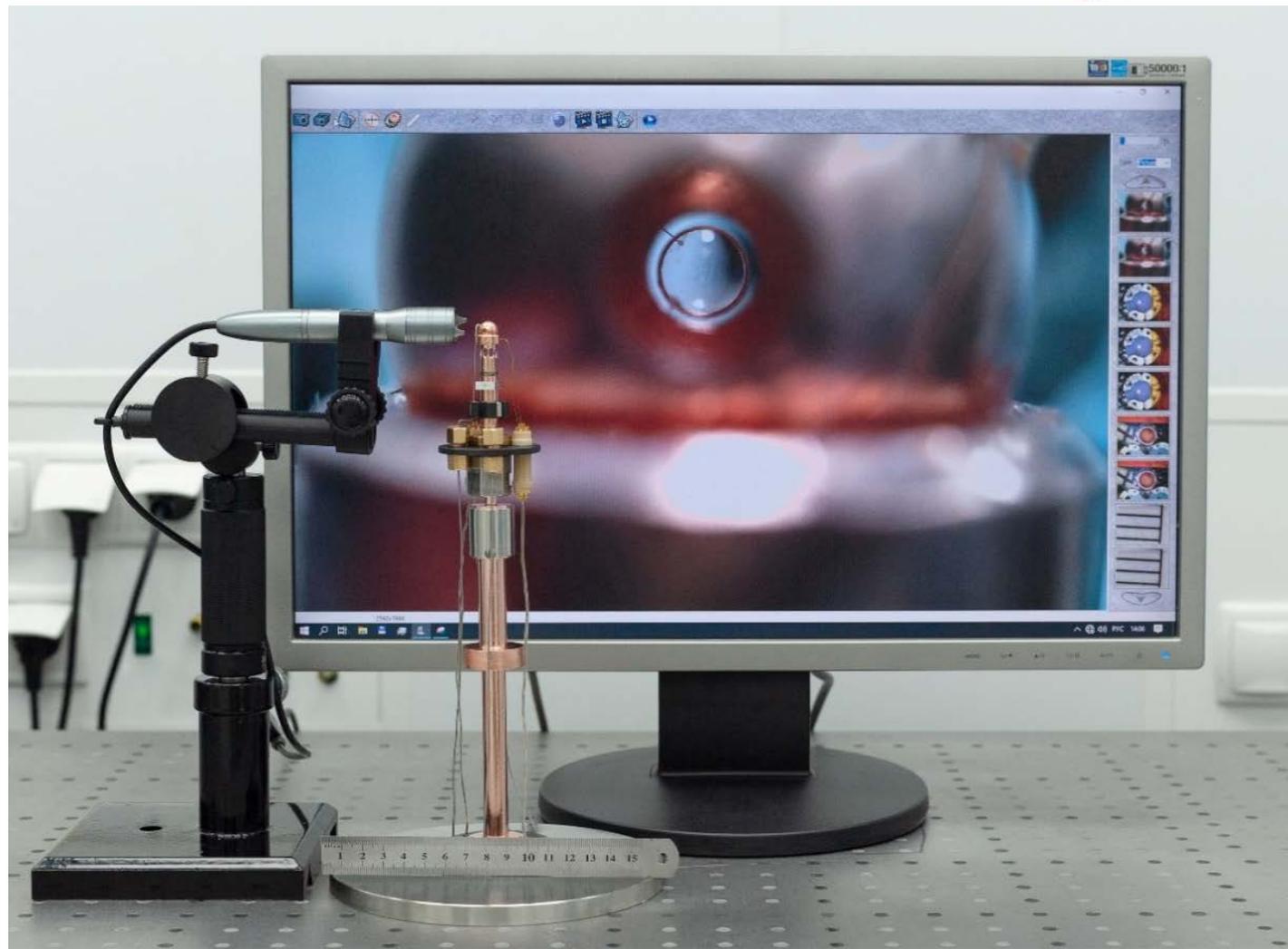
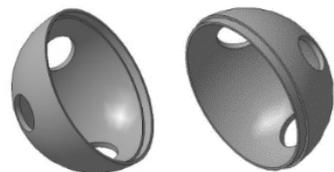


Введен в опытную эксплуатацию многоцелевой исследовательский комплекс (МИК)

Состав: 2 МСУ (16 каналов), система транспортировки, система преобразователей во вторую гармонику с системой фокусировки и наведения, малая камера. Энергия на мишени до 230 кДж, импульс профилированный от 0,1 до 20 нс.



Введен в эксплуатацию комплекс для работы с криогенными мишенями (мишенная фабрика)

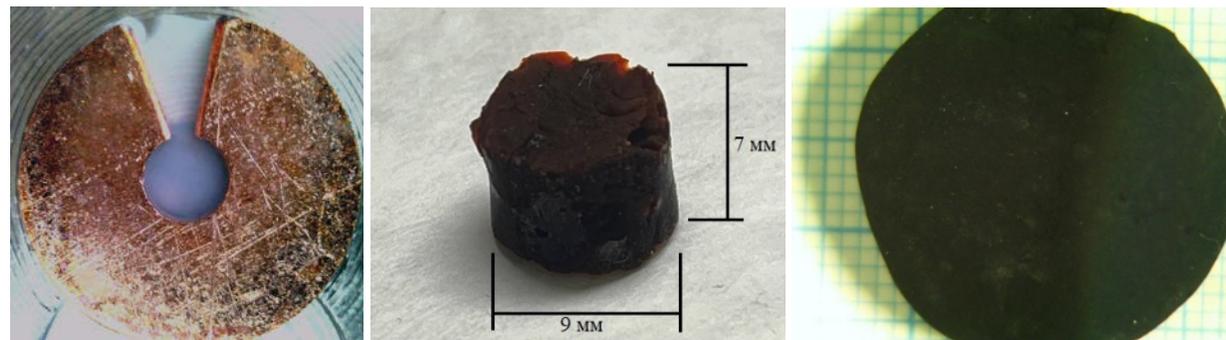


Разработана сквозная технология изготовления криогенных мишеней, обеспечивающая отклонение параметров от заданных не более 1%

Отработаны технологии и изготовлены прототипы мишеней для экспериментов на лазерных установках ИЛФИ



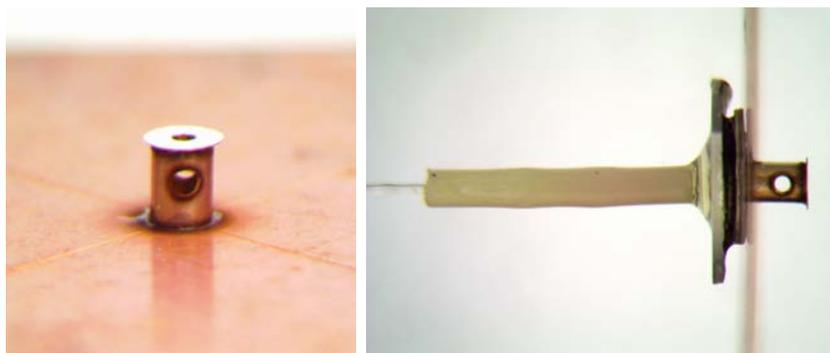
Мишени для изучения свойств астероидного материала



Мишени для исследования малоплотных материалов (пен), на основе триацетата целлюлозы (ТАЦ-пена), резорцин-формальдегида (РФ-пена) и аэрографита. Плотность варьируется от 1 до 500 мг/см³, массовая концентрация легирующей примеси в виде наночастиц (Au, Ag, Cu) варьируется от 1 до 80%.



Мишени типа МОК с полимерными и металлическими корпусами

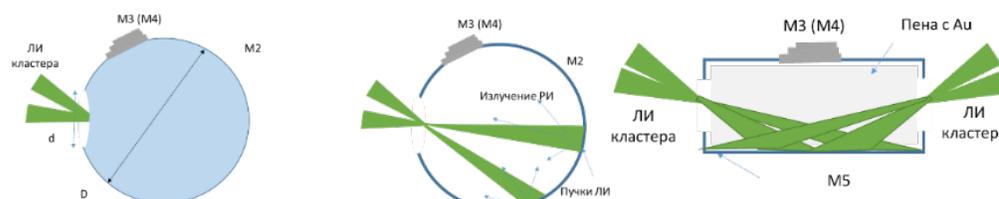


Мишени для исследования изэнтропической сжимаемости материалов

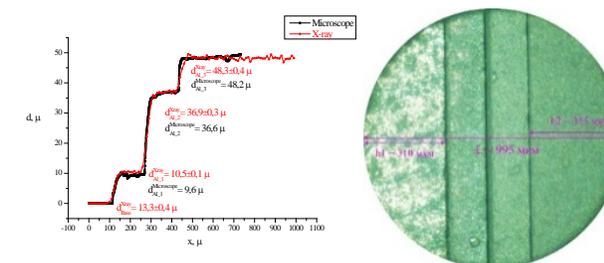
Характерные геометрические размеры мишеней варьируются от 0,05 мм до 15 мм



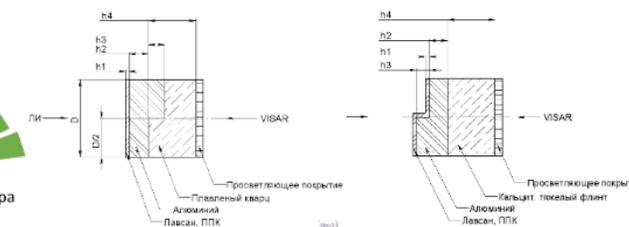
Мишени типа ГМ, полностью полимерный корпус



Сложносоставные мишени для исследования однородности и стационарности УВ на МИК



Мишени для исследования ударных волн



Мишени для исследования ударной сжимаемости представителей грунтов

Комплекс диагностики плазмы лазерных мишеней

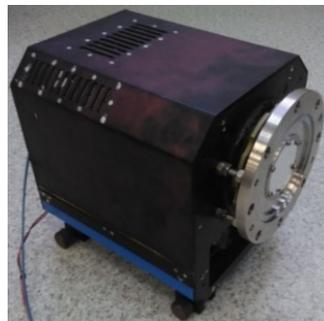
МИК оснащен комплексом диагностик:

измерения баланса энергии и диаграммы направленности потоков излучений и частиц, рентгеновские дозиметры и калориметры, электронные магнитные спектрометры, рентгеновские спектрометры, рентгеновские камеры-обскуры, скоростные ЭОПы и РЭОПы на основе полупроводниковых и алмазных детекторов, измерения скорости движения УВ методом PDV, индукционные магнитные датчики, нейтронные диагностики методом затянутой регистрации и активации In и Cu.

Комплекс обеспечивает

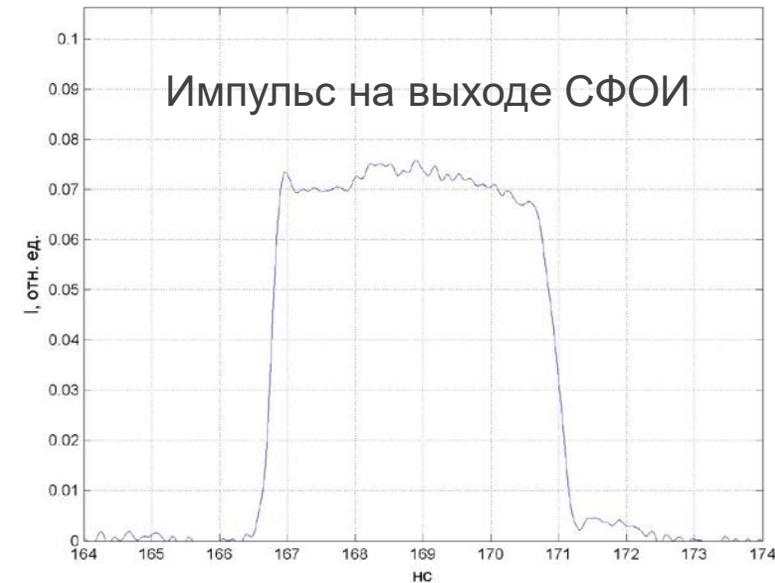
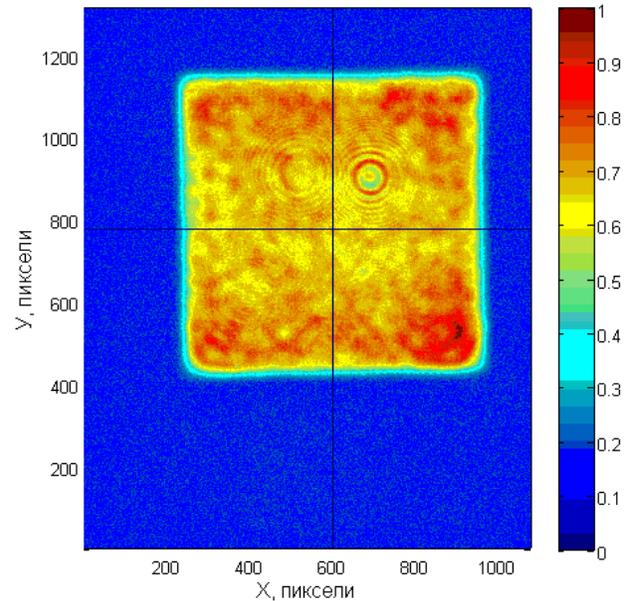
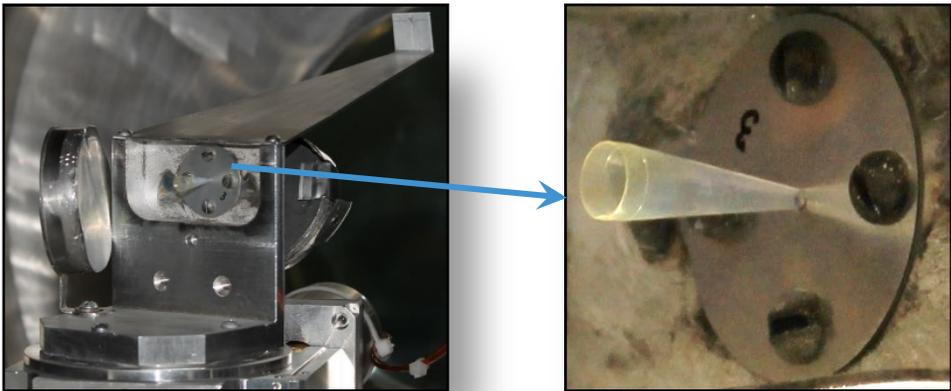
временное разрешение - $\Delta\tau \sim 0,01$ нс;
пространственное разрешение - $\Delta x \sim 10$ мкм;
диапазон измерения температур – $1 \text{ эВ} \leq T \leq 5 \cdot 10^4 \text{ эВ}$;
спектральный диапазон регистрируемых квантов – $1 \leq h\nu \leq 2 \cdot 10^7 \text{ эВ}$;
спектральный диапазон регистрируемых частиц – $10^2 \leq E \leq 3 \cdot 10^7 \text{ эВ}$.

В 2024 году комплекс будет оснащен методикой VIZAR и многокадровыми скоростными системами регистрации в оптическом и рентгеновском диапазонах



Первые эксперименты на МИК (4 канала 2021 год)

Эксперименты с МОК



Мишень МОК: конус 5 мм (основание) × 19,8 мм (высота)

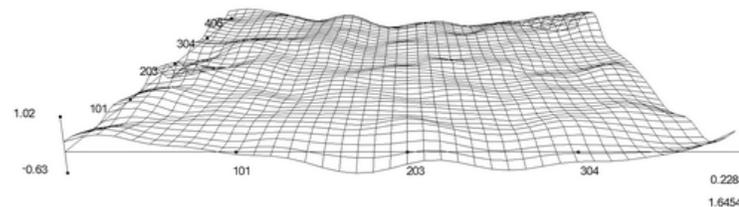
Материал: ППК 49 мкм + CD 2,5 мкм

Проведено 2 эксперимента

Энергия: 8 – 12 кДж (1ω); 3 – 4,8 кДж (2ω)

Нейтронный выход: $(4-6) \cdot 10^6$

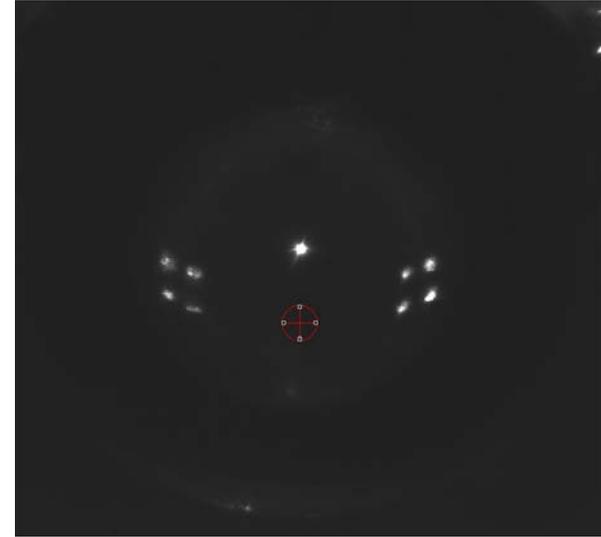
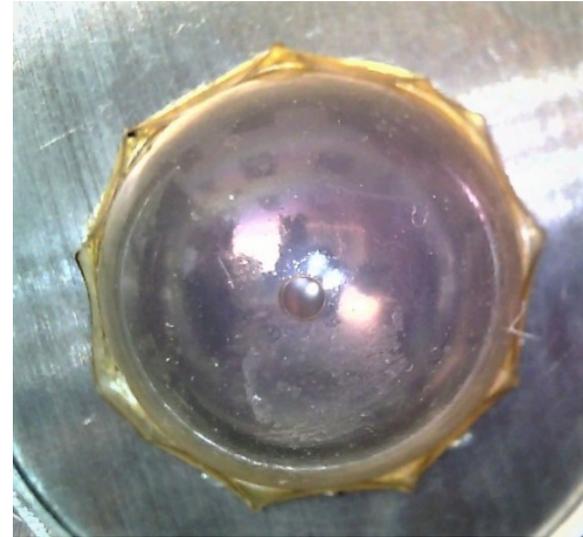
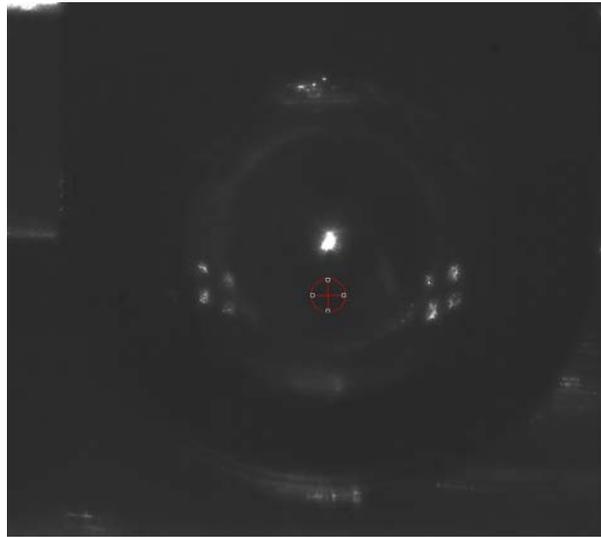
Форма волнового фронта



PV=1,64 мкм, RMS=0,22 мкм

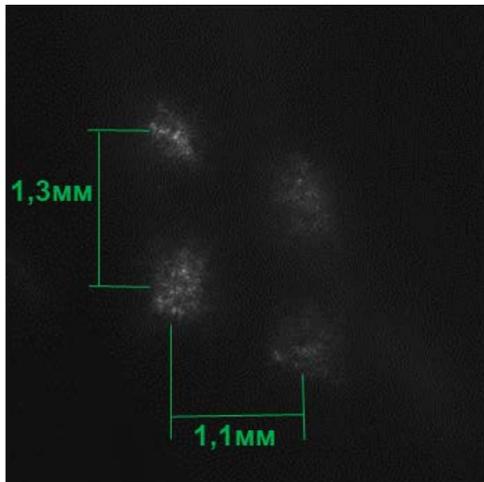


Эксперимент с МОК (16 каналов 2023)

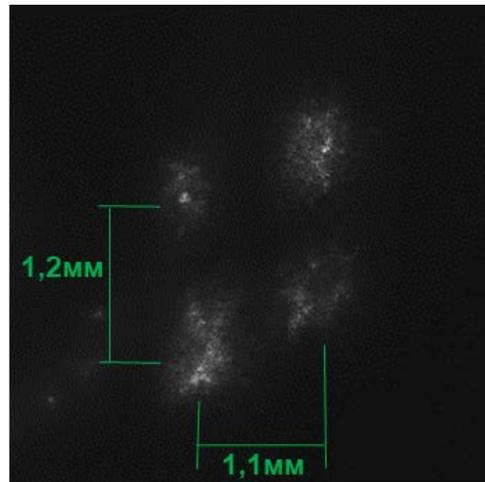


Вид со стороны 12 модуля, пучки 24 модуля

Вид со стороны 24 модуля, пучки 12 модуля

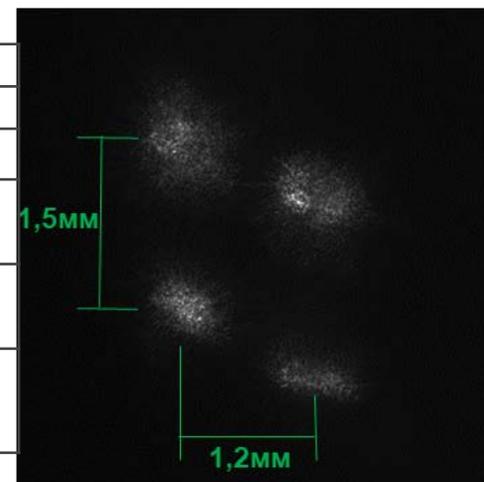


Кластер 3

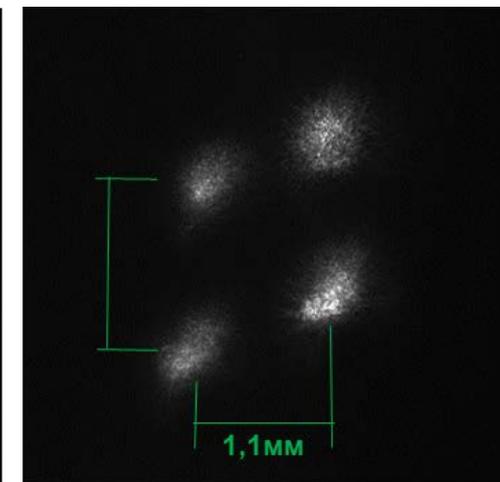


Кластер 4

Параметр	Сторона	
	1	2
ППК, мкм	15,0	15,0
Толщина CD, мкм	10	10
Оболочка Ø мм	14,8	14,9
Отверстие Ø мм	1,53	1,55



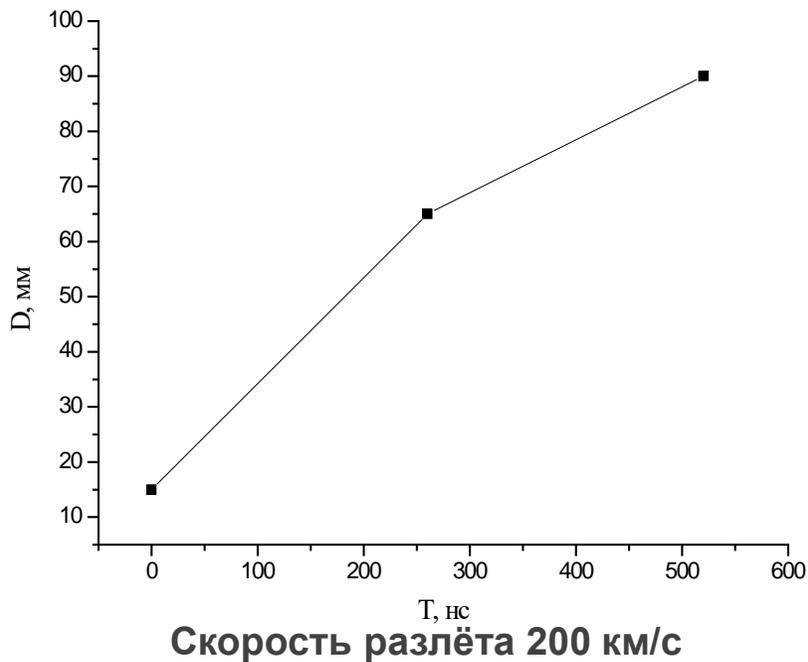
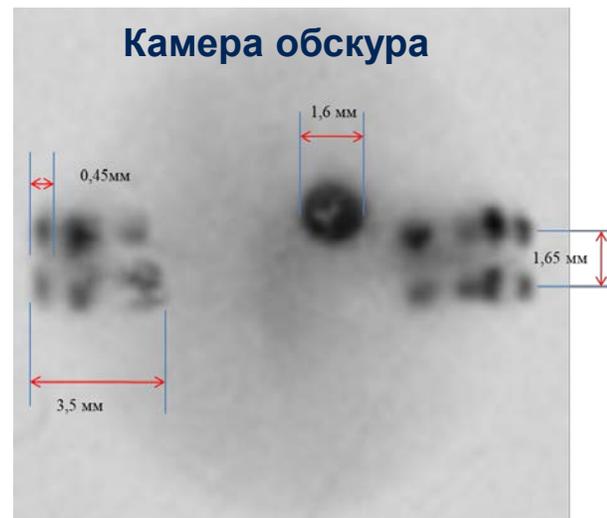
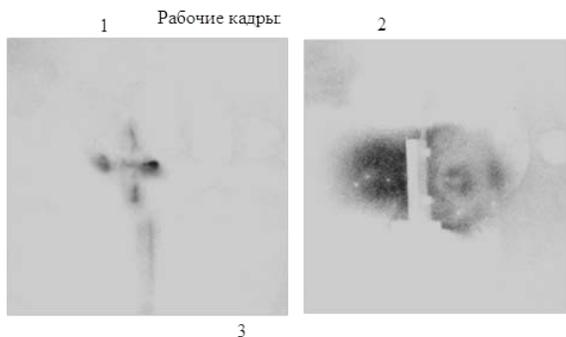
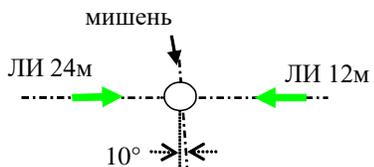
Кластер 1



Кластер 2

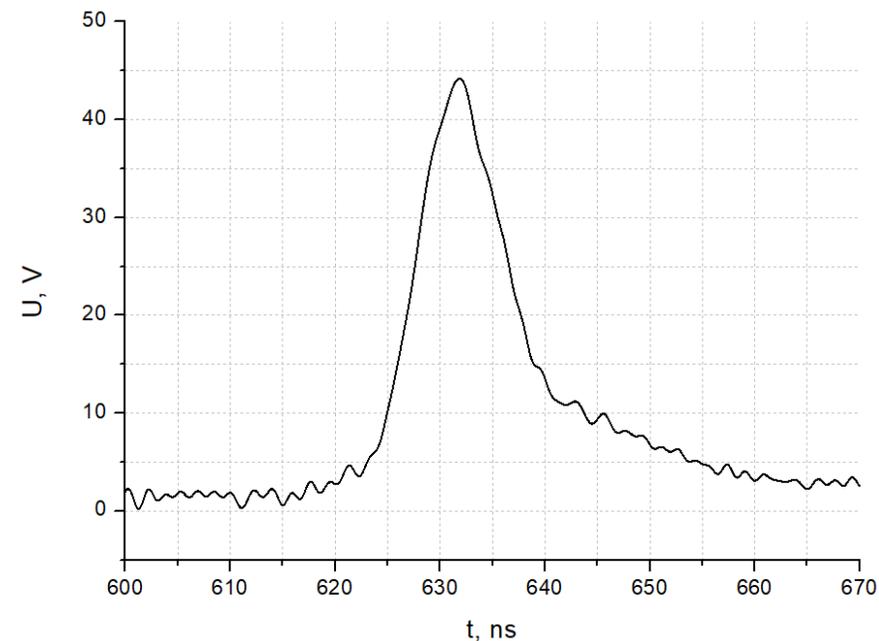
Результаты эксперимента

Многокадровый РЭОП



Нейтронный выход

МЗР	ВПМ	Акт. In	Итого
зашкал	$(25 \pm 3) \cdot 10^8$	$(27 \pm 4) \cdot 10^8$	$(26 \pm 4) \cdot 10^8$



нейтронный выход $(2.5 \pm 0.3) \times 10^9$
 длительность импульса 9.9 ± 1.0 нс
 ионная температура 38.9 ± 4.0 кэВ
 задержка от γ -импульса 5.1 ± 0.5 нс
 скорость полёта 1.47×10^8 см/с

- Первый этап создания мощной лазерной установки завершен
- Реализованные параметры полностью соответствуют требованиям ТТЗ
- Начаты первые эксперименты
- Приглашаем принять участие в разработке программы экспериментов

Спасибо за внимание!