

# Комплекс ГОЛ-3

Д.И. Сквородин

от имени команды

# Введение

---

## Работы лаборатории:

- ❖ **Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.**
- ❖ **Развитие физики многопробочного удержания.**
  - ❖ **Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.**
  - ❖ **Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.**
- ❖ **Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.**
  - ❖ **Эксперимент ГОЛ-ПЭТ, взаимодействие мощных пучков с плазмой.**
  - ❖ **Работы по проекту ЛИУ.**
  - ❖ **Взаимодействие плазмы с поверхностью.**

## Работы лаборатории:

- ❖ **Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.**
- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
  - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
  - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.
  - ❖ Эксперимент ГОЛ-ПЭТ, взаимодействие мощных пучков с плазмой.
  - ❖ Работы по проекту ЛИУ.
  - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.

# Участие в разработке Международного Экспериментального реактора ИТЭР



ИТЭР строится по графику. Первая плазма намечена на 2025 год

# Сборочная площадка ИТЭР



Термошит термостата



Сектор вакуумной камеры



SuperTool

# Сборочная площадка ИТЭР

Нижний порт



Сектор вакуумной камеры

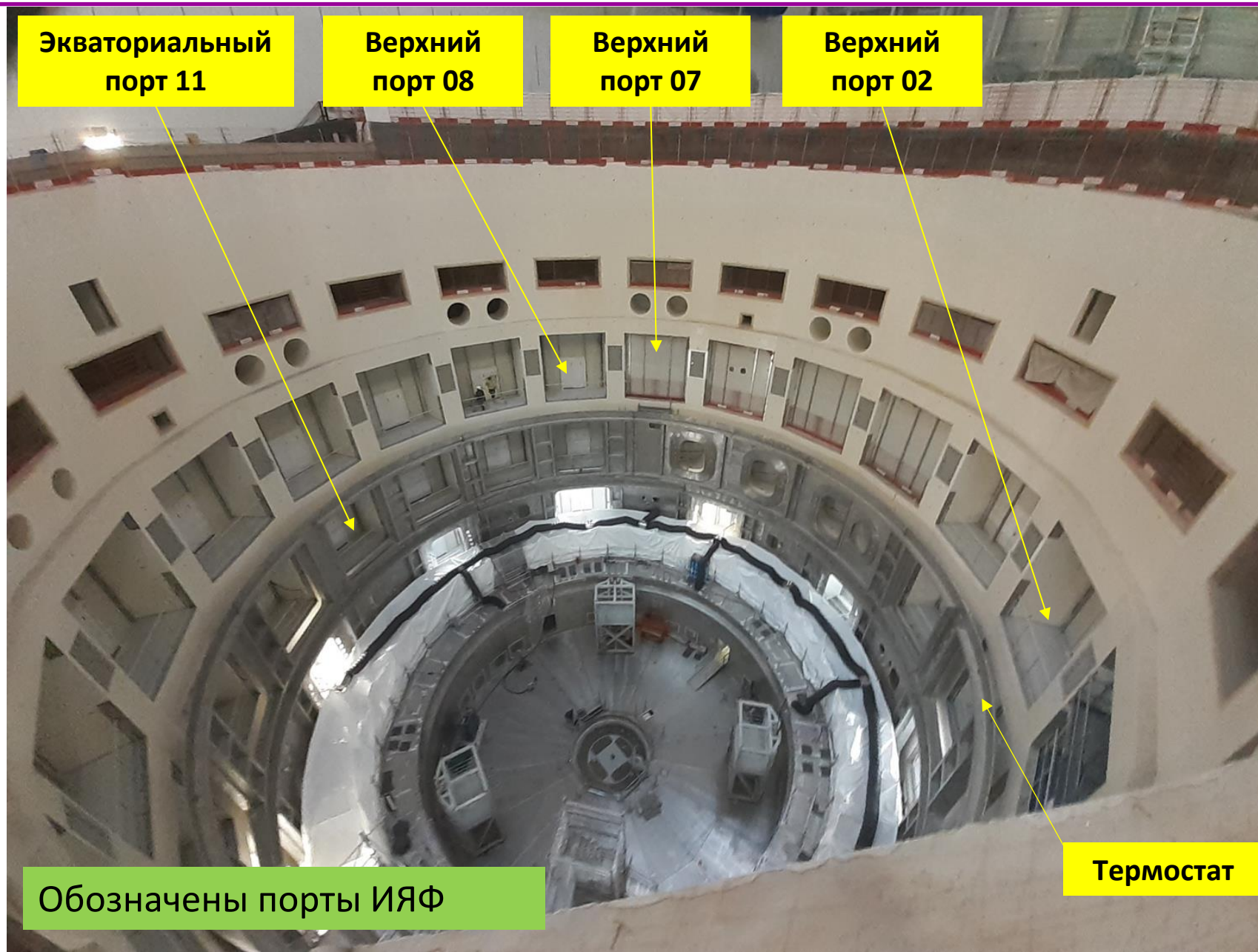


Экваториальный порт

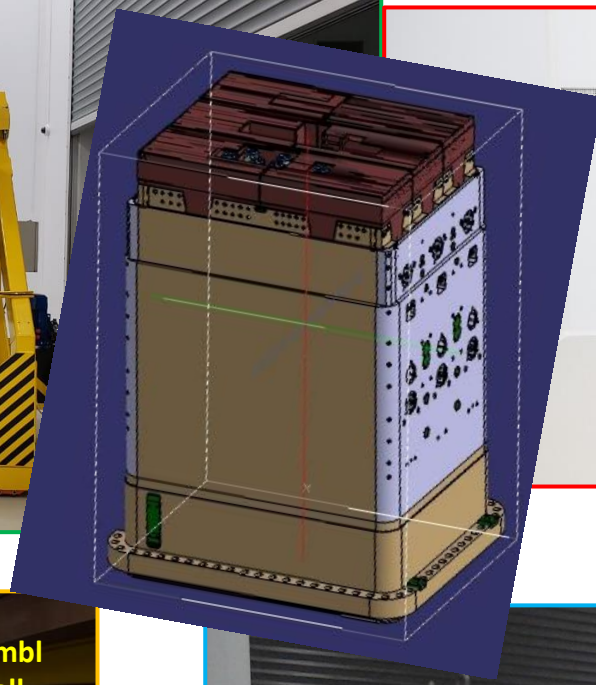
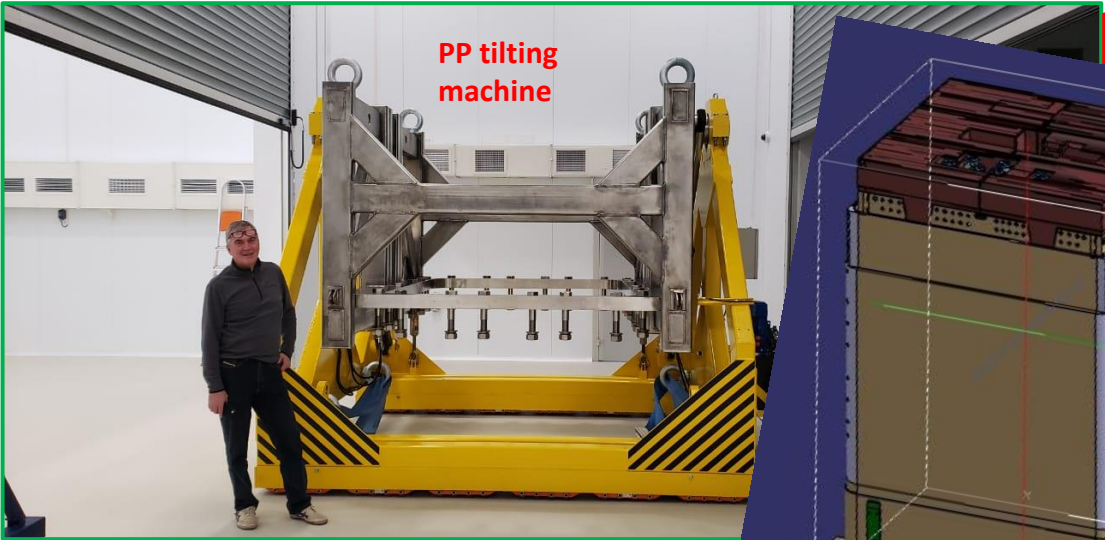


Максим Иванцовский возле портов

# Сборка реактора ИТЭР в защищенном зале



# Сборочная площадка ИЯФ





# ИТЭР в ИЯФ: состояние и перспективы

---

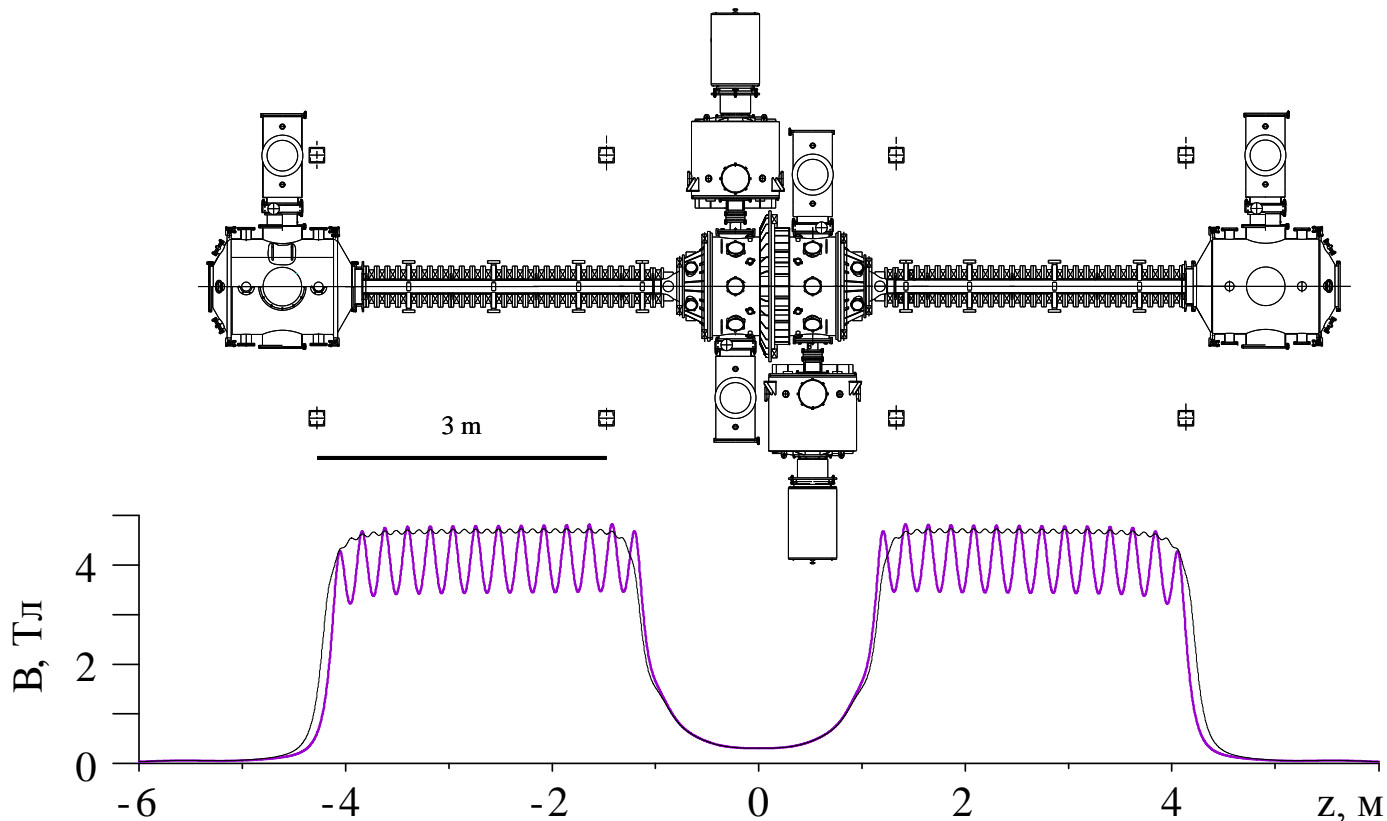
- **2021 – ДЗМ №2 ЭП11 – произведен;**
- 2022 – ДЗМы №1, 3 ЭП11 – произведены;
- 2022 – производство ОРОП, ОРПК;
- 2023 – ОРОП, ОРПК – произведены;
- 2023 – сварка фланцев на СР;
- 2023 – сборка порт-плага;
- 2024 – отправка ЭП 11 в ИТЭР;
- **2021 – колимационные модули NRA №1, 2, 3 - произведены;**
- 2022 – коллиматор NRA – произведен
- **2021-2022 – «ядерный макет» ВНК – произведен;**
- 2023-2024 – производство модулей ВНК (с ураном);
- **2021-2023 – производство модулей ДМНП (4 шт / с ураном);**
- 2023 – поставка модулей ДМНП в ИТЭР;

## Работы лаборатории:

- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.
- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
  - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
  - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.
  - ❖ Эксперимент ГОЛ-ПЭТ, взаимодействие мощных пучков с плазмой.
  - ❖ Работы по проекту ЛИУ.
  - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.



# Установка ГОЛ-НВ



## Основная цель создания установки:

изучение технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса и создание физической базы для ГДМЛ.

Работы на ГОЛ-НВ войдут в Мероприятие 1.1.6 федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».



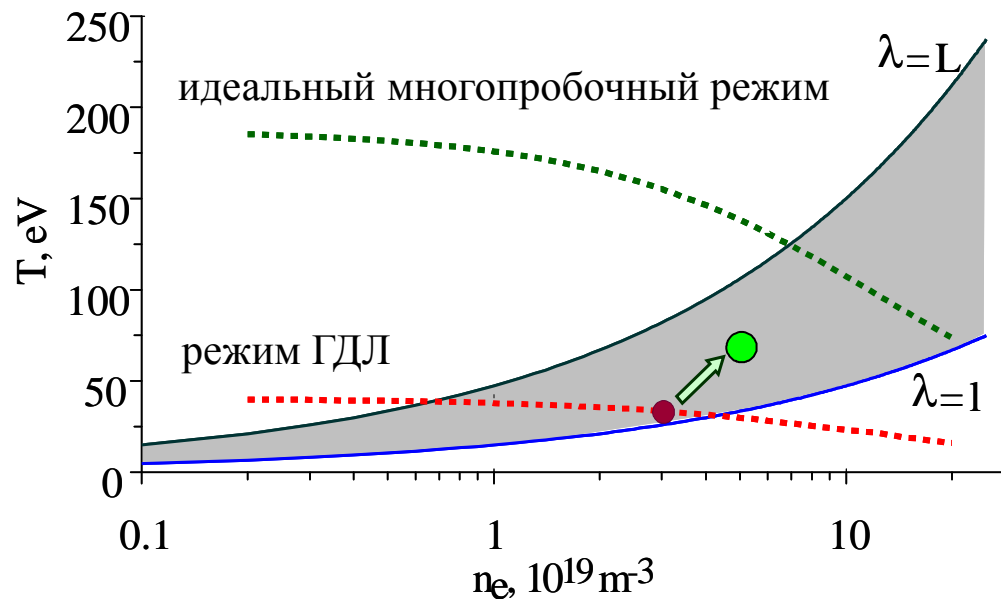
# Область параметров

## Достижимые параметры плазмы

если будет достигнута стабилизация плазмы, то её параметры будут определяться энергобалансом между нагревом и продольными потерями.

### Доступная область параметров

пунктир – разрешено по энергобалансу  
серый сектор – разрешено по физике





# Результаты сезона до 01.02.2021

---

- Завершена программа работ в стартовой конфигурации (2017 – 03.2020):
  - впервые экспериментально подтверждено предсказание теории 1972 г. об одинаковом характере течения сильностолкновительной плазмы в однородном и гофрированном магнитном поле (2019);
  - улучшена транспортировка стартовой плазмы до центральной ловушки через 4-метровую секцию с сильным магнитным полем (март 2020).
- Полностью собрана магнитовакуумная система установки.
- Получен рабочий вакуум.
- Всё силовое питание подключено и проверено.
- Поток низкотемпературной стартовой плазмы из дугового источника (плазменной пушки) успешно доведён до центральной ловушки.

# ГОЛ-NB сегодня



К юбилею Александра Николаевича Скринского собрана установка ГОЛ-NB

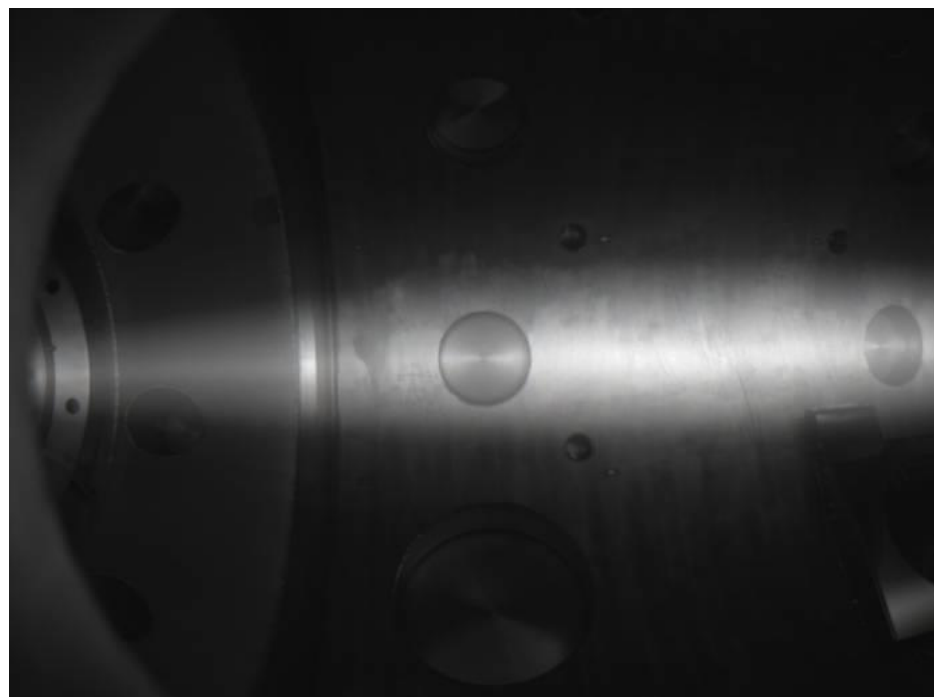
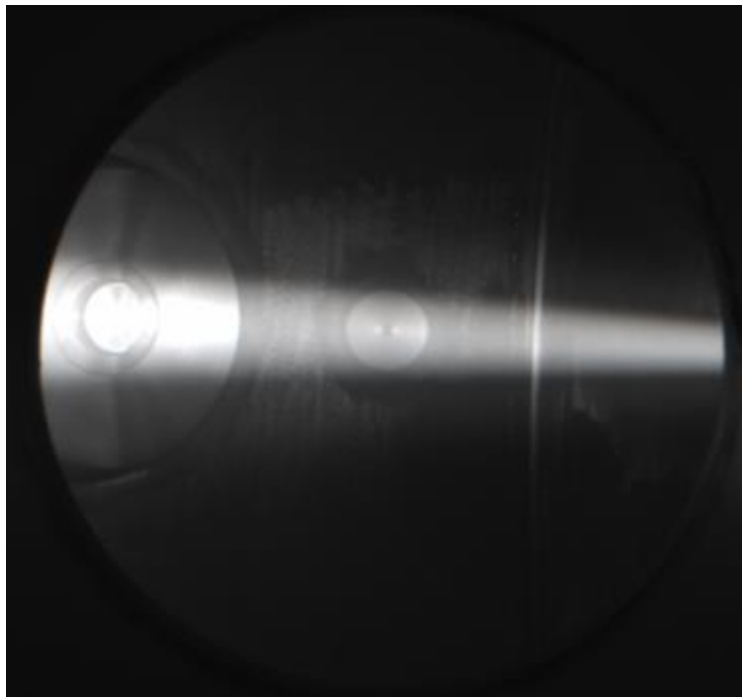


# Стартовая плазма в ГОЛ-NB

## Плазма из дугового источника

## Плазма в центральной ловушке

NB4856 \* 29.01.2021



Струя плазмы распространяется слева направо из дугового источника (за полем зрения камеры) в сторону нарастающей магнитной индукции в секции сильного поля.

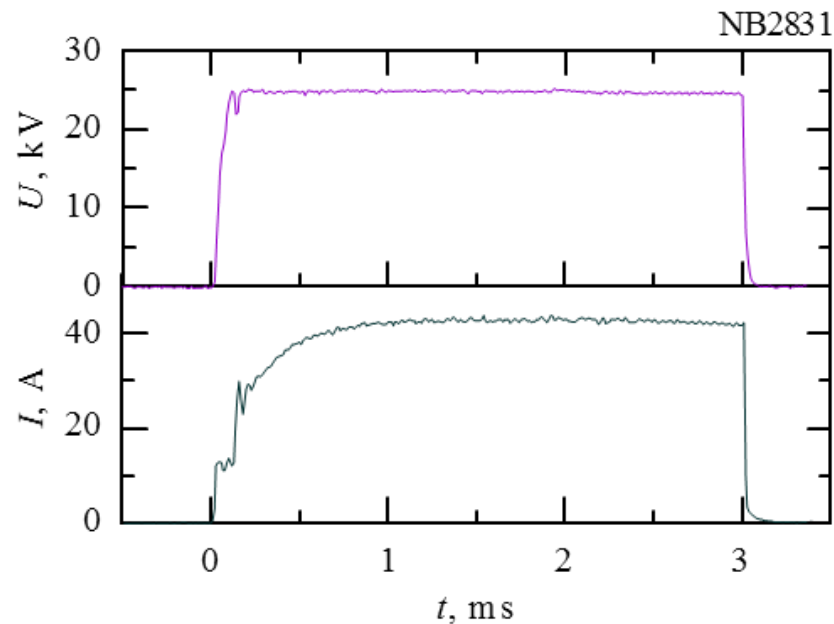
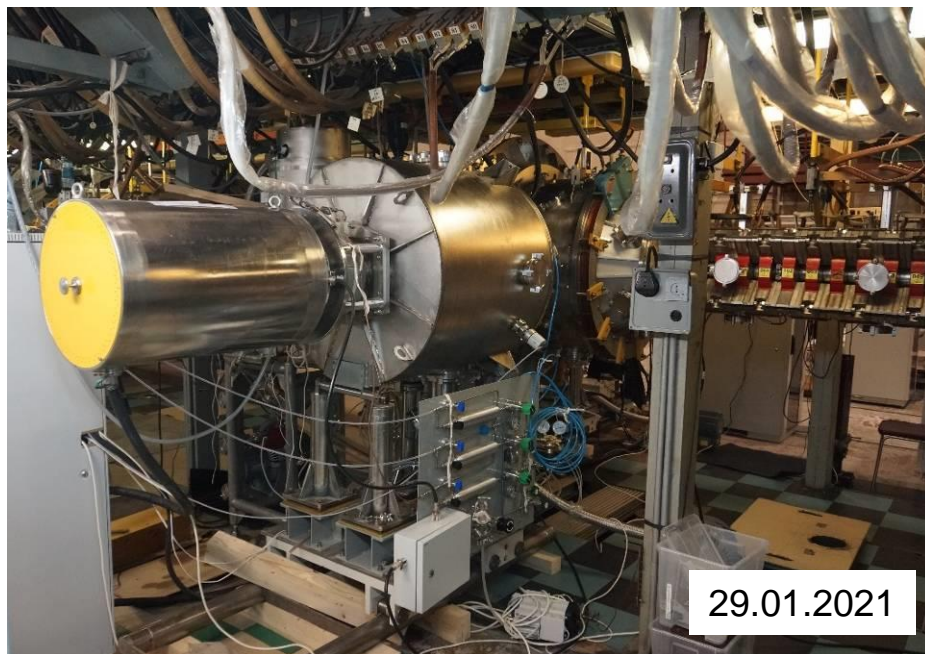
Плазменная струя расширяется после выхода из секции сильного поля.

Оценка диаметра плазмы по её свечению даёт величину около 20 см.



# Инжектора для нагрева плазмы

- Два инжектора изготовлены и испытаны с системами питания.
- Получена мощность 1 МВт в каждом ионном пучке, длительность до 5 мс.
- Изготовлена дополнительная магнитная защита.
- Монтаж на штатное место может быть выполнен в течение недели.
- Диагностика ослабления пучков в плазме в процессе подготовки.

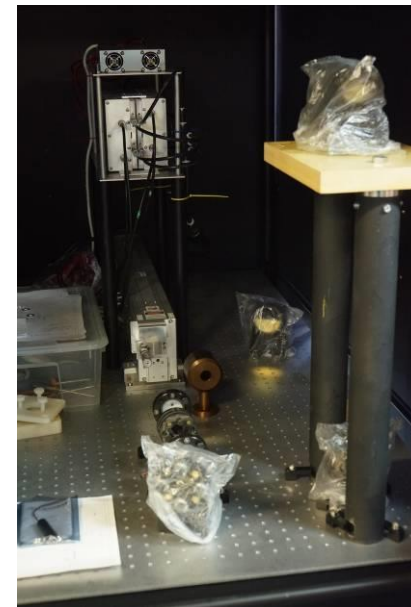




# Системы диагностики плазмы

- **стартовый комплект диагностик включает:**
  - электротехнические измерения;
  - подвижные четырёхэлектродные ленгмюровские зонды;
  - ПЗС-камеры;
  - диагностический атомарный пучок 10 кэВ;
  - ослабление нагревных пучков;
  - простейшие магнитные зонды;
  - мониторы излучения плазмы;
  - обзорный спектр свечения плазмы;
  - динамика давления газа.
- **ведётся подготовка диагностик:**
  - анализатор нейтралов перезарядки;
  - доплеровская спектроскопия высокого разрешения;
  - скоростные видеокамеры;
  - интерферометр Майкельсона с  $\lambda = 10,6$  мкм.
- **другие важные системы требуют разработки.**

стол с частью элементов интерферометра с  $\lambda = 10,6$  мкм



диагностический инжектор



два двойных полихроматора



четырёхэлектродные зонды





# Программа работ

---

- Запуск и выведение установки ГОЛ-NB на проектные параметры.
- Начало экспериментов по физической программе:
  - Стартовая плазма: изучение заполнения центральной ловушки;
  - Плазма с нагревом нейтральными пучками;
  - Достижение устойчивости плазмы в ловушке;
  - Поиск оптимальных сценариев эксперимента и режимов работы установки.
- Потребности:
  - Обновление инфраструктуры;
  - Создание диагностик плазмы;
  - Разработка и создание систем дополнительного нагрева плазмы.
- Разработана среднесрочная программа работ.

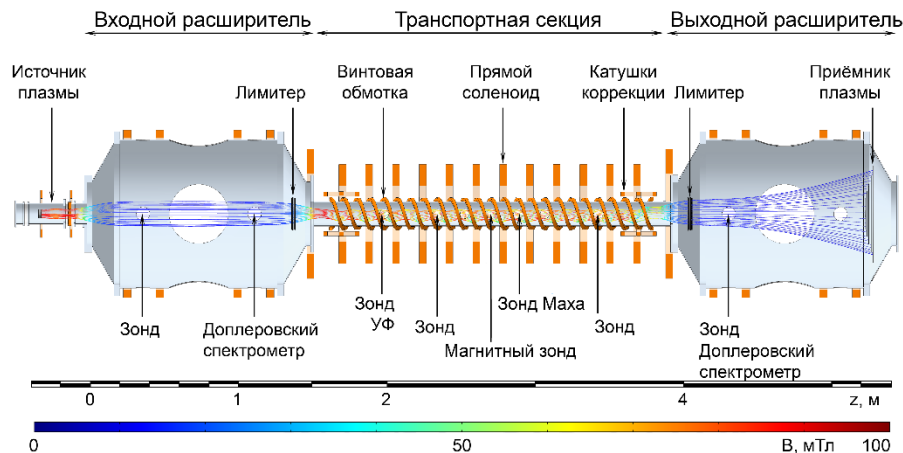
# Динамическое многопробочное удержание. Установка «СМОЛА»



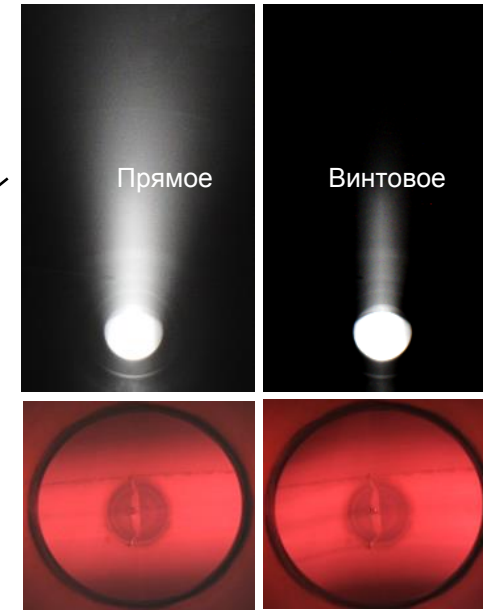
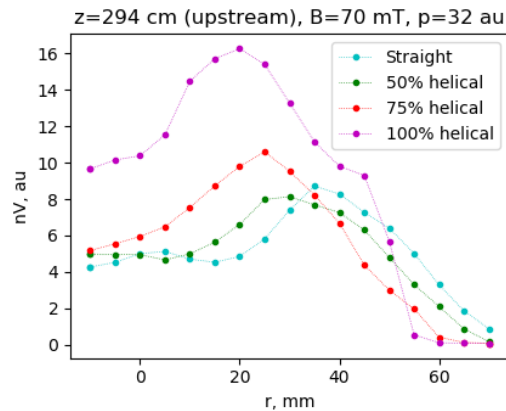
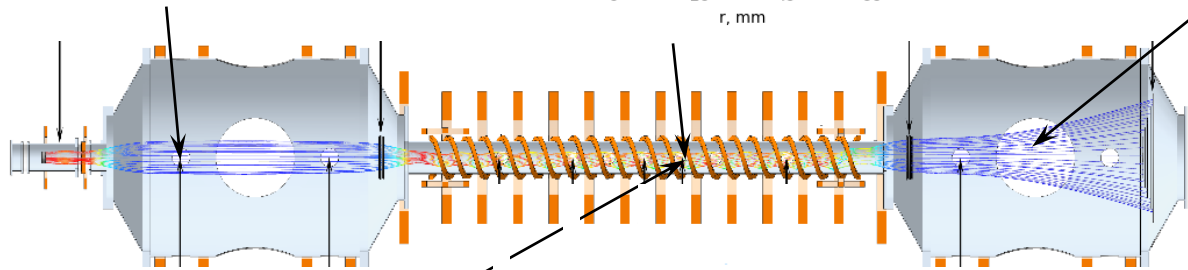
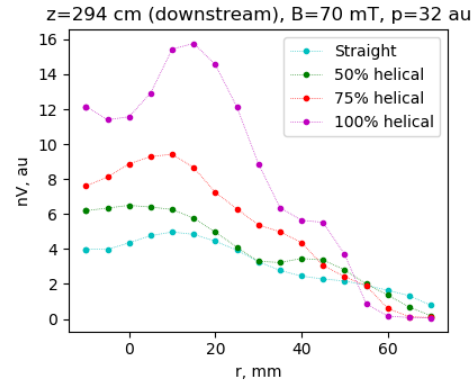
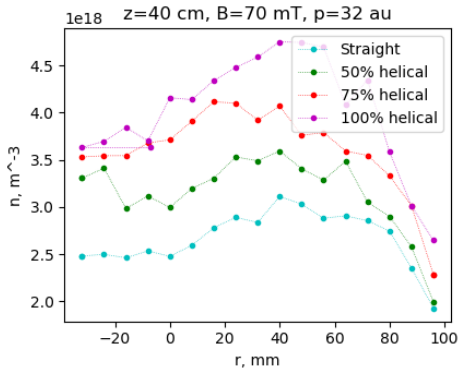
Установка «СМОЛА» создана в рамках «репутационного» гранта РФФИ. Запуск — конец 2017 года, в 2019 году доведена до проектной конфигурации

Задача: проверка подавления потока вращающейся плазмы в винтовом магнитном поле.

В 2020 году изучалось управление вращением плазмы, проводились детальные измерения транспортировки плазменной струи в режиме удержания (завершаются в январе 2021).



# Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2020 года.



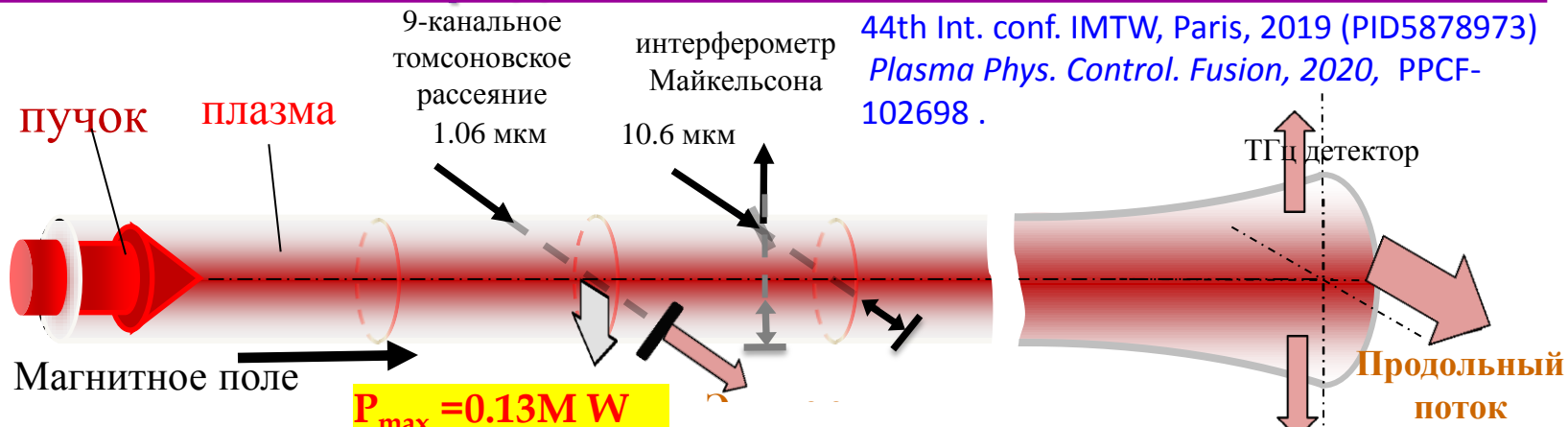
Показан рост плотности в области удержания при включении винтовой пробки.  
Наблюдается увеличение «обратного» потока вещества в середине винтовой пробки  
Есть существенное падение плотности потока на выходе из винтовой пробки

## Работы лаборатории:

- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.
- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
  - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
  - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ **Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.**
  - ❖ **Эксперимент ГОЛ-ПЭТ, взаимодействие мощных пучков с плазмой.**
  - ❖ **Работы по проекту ЛИУ.**
  - ❖ **Взаимодействие плазмы с поверхностью.**

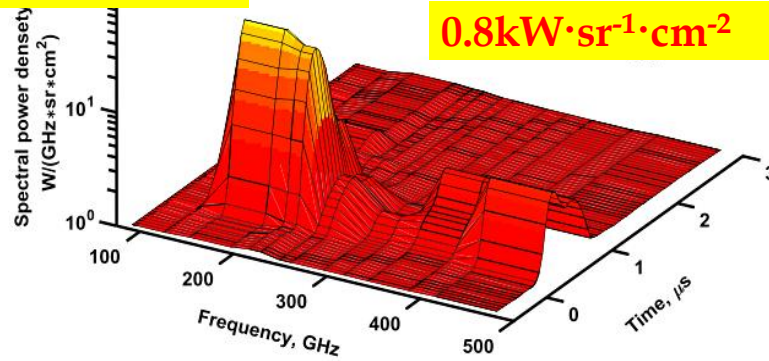
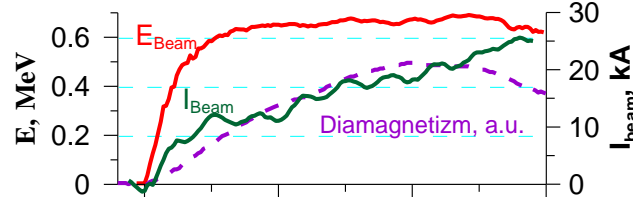
# ГОЛ-ПЭТ: рост генерации ТГц-излучения при повышении градиентов плотности плазмы

44th Int. conf. IMTW, Paris, 2019 (PID5878973)  
 Plasma Phys. Control. Fusion, 2020, PPCF-102698 .



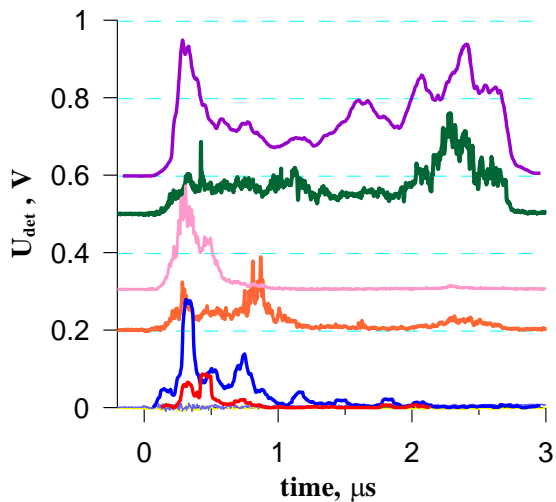
$P_{max} = 0.13 \text{ MW}$

$0.8 \text{ kW} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$



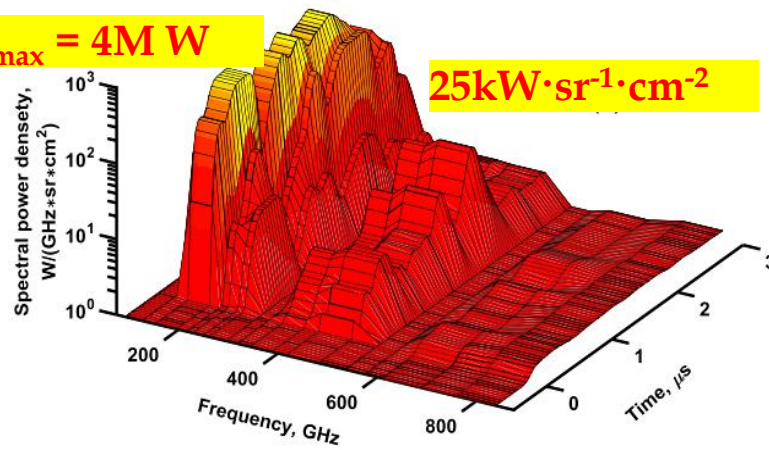
К 8-канальному  
ТГц полихроматору

Однородное сечение  
плазмы при плотности  
 $\sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



$P_{max} = 4 \text{ MW}$

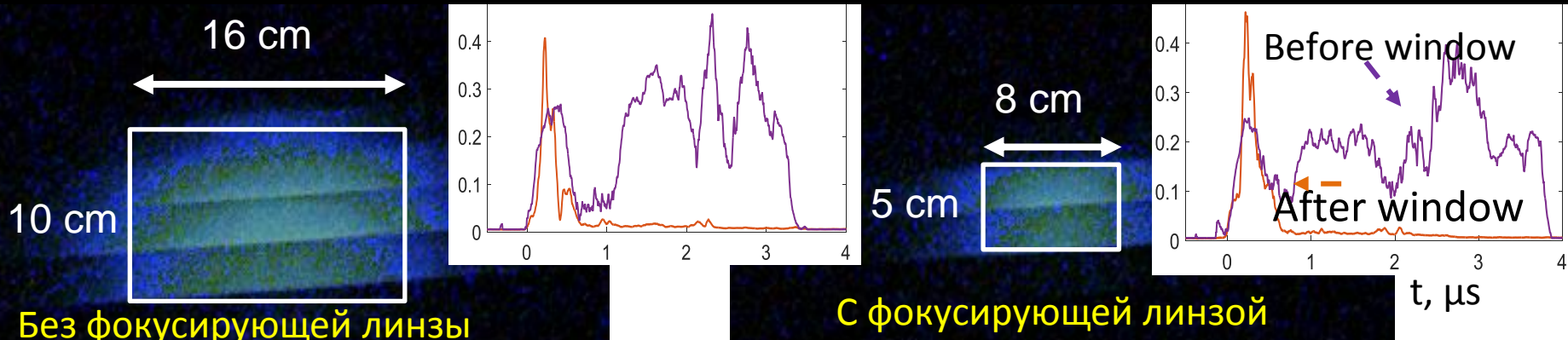
$25 \text{ kW} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$



Сечение плазмы с  
градиентами плотности  
 $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-4}$

# Сечение потока ТГц-излучения на различном расстоянии от выходного окна

## Изменения сечения потока излучения при фокусировке



Свечение панели, составленной из трубок газоразрядных ртутных ламп

[A Arzhannikov et al. 2020 Proc. of SPIE Vol. 11582 115820V-6](#)

[A Arzhannikov et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1647 012010](#)

## Сечение потока излучения на различном расстоянии от выходного окна

L=40 cm

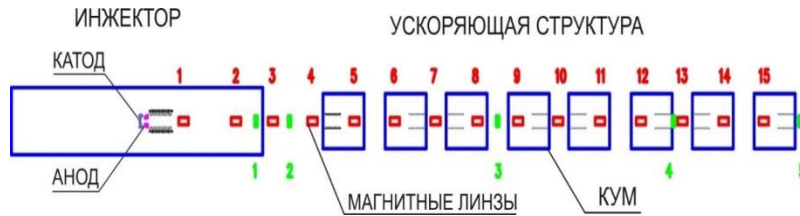
L=108 cm

L=320 cm

$P_{\text{max}} \sim 10\text{M W}$

Свечение панели, составленной из неоновых лампочек (диаметр окружности 24 см)

# Поперечная неустойчивость пучка в ЛИУ



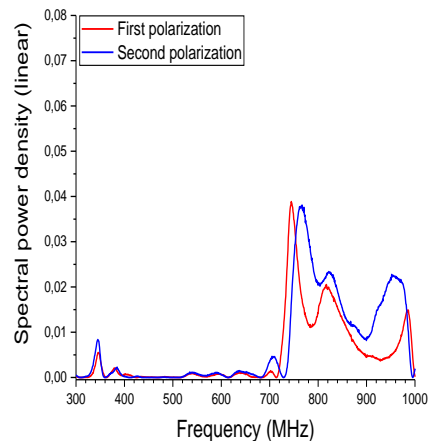
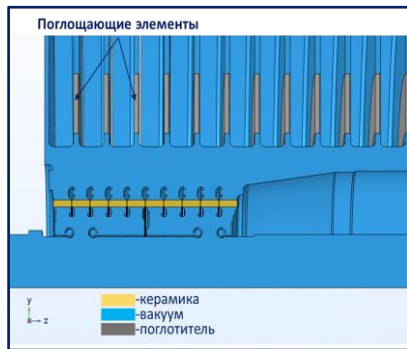
Смещение пучка в ЛИУ в результате развития ВВУ неустойчивости:

$$\xi(z) = \xi_0 \left[ \frac{\gamma_0}{\gamma(z)} \right]^{1/2} \exp \left[ \frac{I_b [kA] N_g Z_{\perp} [\Omega / m]}{3 \cdot 10^4 \langle B [kG] \rangle} \right], \quad Z_{\perp} = \frac{Q}{\omega} \left( \int B_{\perp} dz \right)^2$$

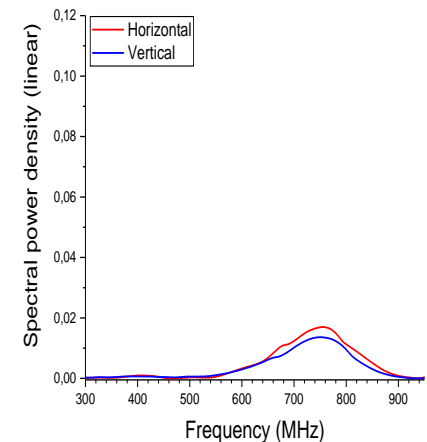
## Методы подавления колебаний:

- уменьшение коэффициента связи пучка с резонатором при помощи специальной формы электродов;
- применение поглотителей полей дипольных мод для снижения их добротностей.

## Измерения ВЧ отклика ускорительного модуля



$$Q \leq 20$$



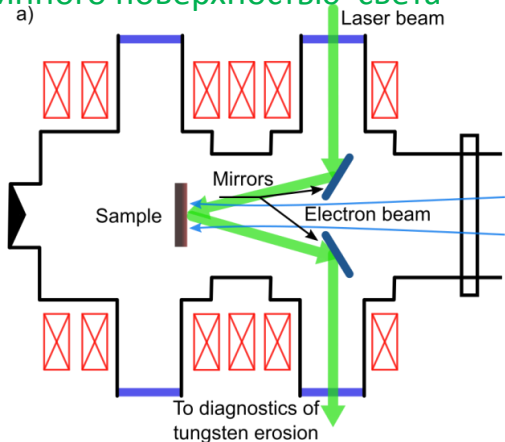
$$Q \leq 10$$

- Найденные решения для контроля неустойчивости обеспечили устойчивую транспортировку пучка ЛИУ.
- Разработаны дополнительные решения для поглощения дипольных мод.

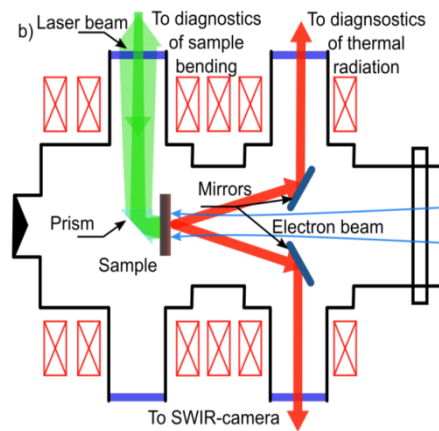


# Развитие дистанционных невозмущающих методов исследования механизмов эрозии материала стенок экспериментальных термоядерных реакторов

**Вид стэнда БЭТА сбоку:** Лазерная диагностика повреждения поверхности по интенсивности рассеянного поверхностью света

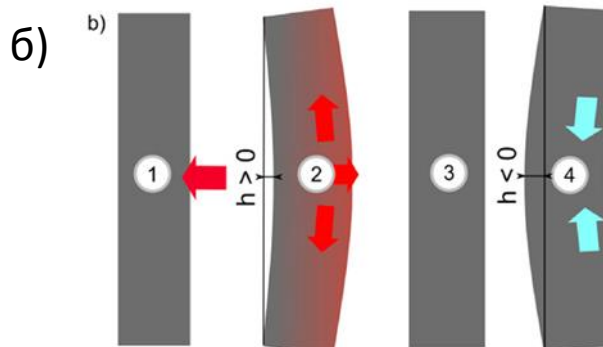
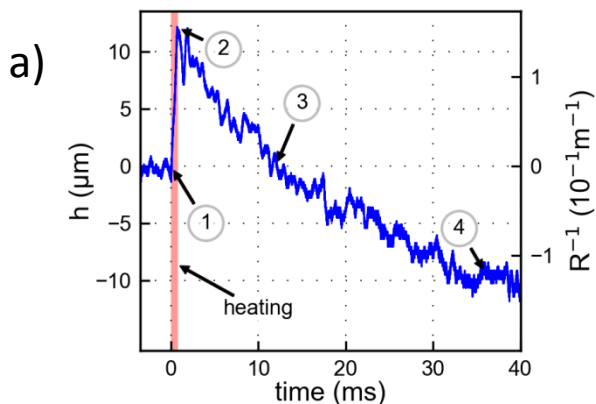


**Вид стэнда БЭТА сверху:** Лазерная диагностика изгиба образца и пирометрия поверхности



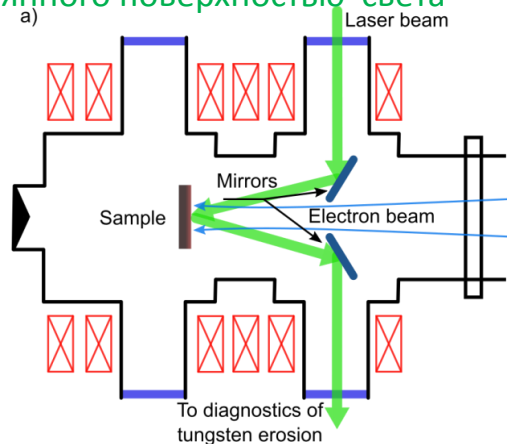
- Интенсивное разрушение стенки реактора вызывают термические удары под действием плазмы.
- В экспериментах термические удары моделируются электронным пучком, что позволило развить уникальный комплекс оптических диагностик

## Диагностика остаточных механических напряжений по изгибу вольфрамовых образцов

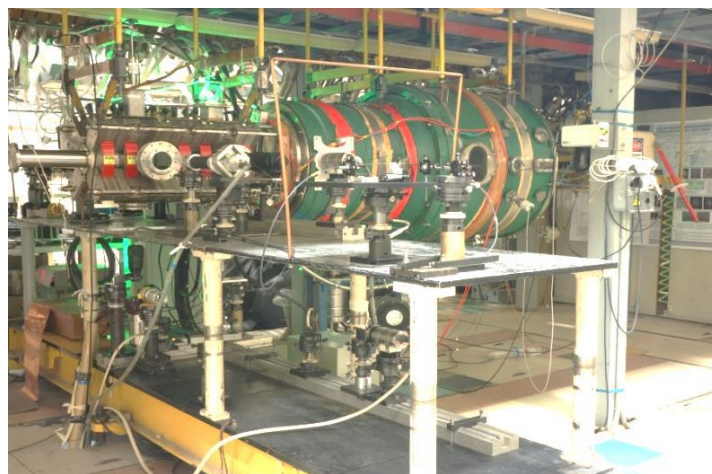
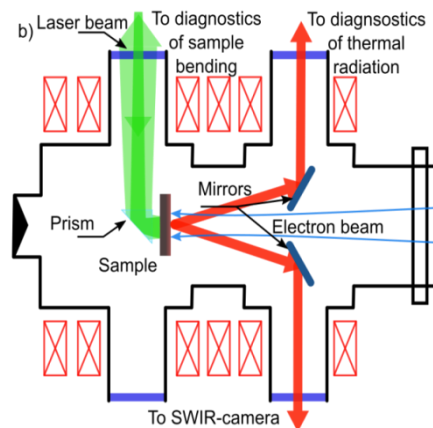


# Развитие дистанционных невозмущающих методов исследования механизмов эрозии материала стенок экспериментальных термоядерных реакторов

**Вид стэнда БЭТА сбоку:** Лазерная диагностика повреждения поверхности по интенсивности рассеянного поверхностью света



**Вид стэнда БЭТА сверху:** Лазерная диагностика изгиба образца и пирометрия поверхности



На основе БЭТА создается новая установка для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью.

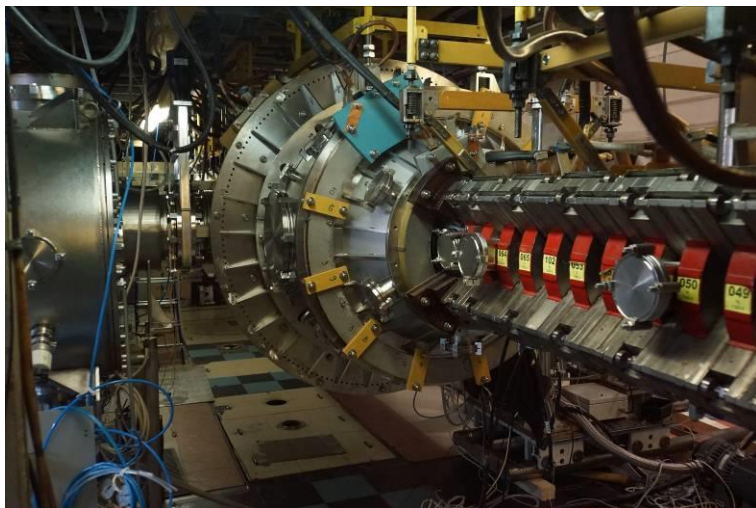
## Заключение

---

- Работы по проекту ИТЭР в ИЯФ переходят в фазу производства оборудования для реактора.
- Установка ГОЛ-NB собрана в полной конфигурации. Проект переходит в стадию работы на эксперимент. Будет продолжено развитие установки.
- Спиральная ловушка СМОЛА работает на набор результатов.
- Развивается школа электронных пучков. Обеспечена устойчивая транспортировка пучка ЛИУ.
- На основе эксперимента БЕТА создается новая установка для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью.

**Спасибо за внимание!**

центральная ловушка и соленоид



бак плазменной пушки и пост откачки



инжектор №2 и пост откачки



кабели питания катушек (до 6 кВ, 10 кА каждый)

