

Развитие комплекса ГОЛ-3

Д.И. Сквородин

от имени команды

Введение

Работы лаборатории:

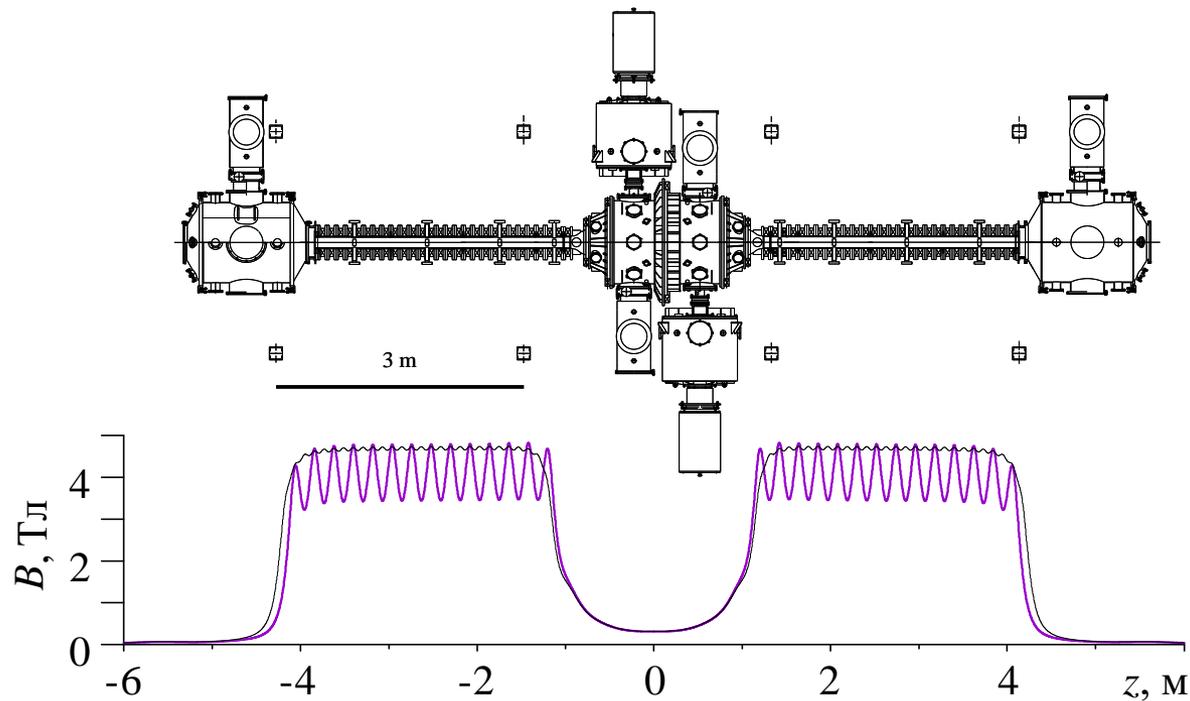
- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.
 - ❖ Эксперимент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

Введение

Работы лаборатории:

- ❖ 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.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ Работы по проекту ЛИУ.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.

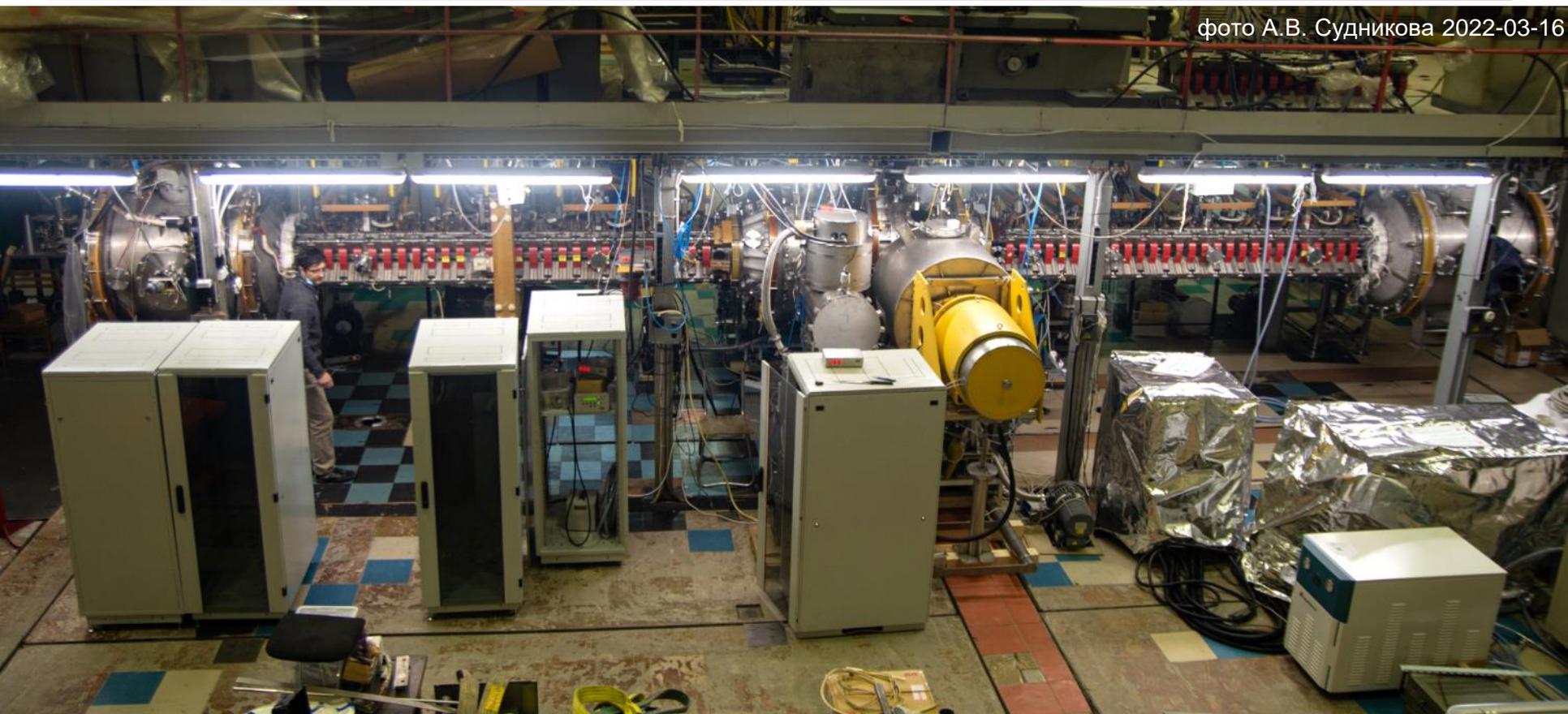
Установка ГОЛ-NB



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.

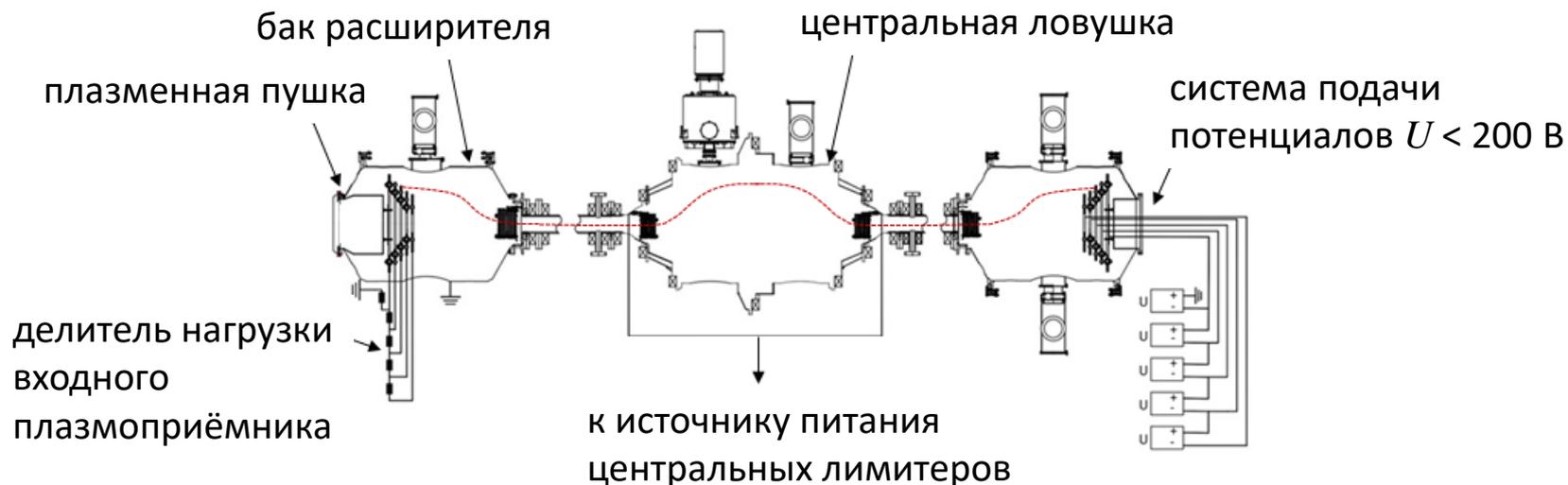
Работы на ГОЛ-NB входят в Мероприятие 1.1.6 федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».



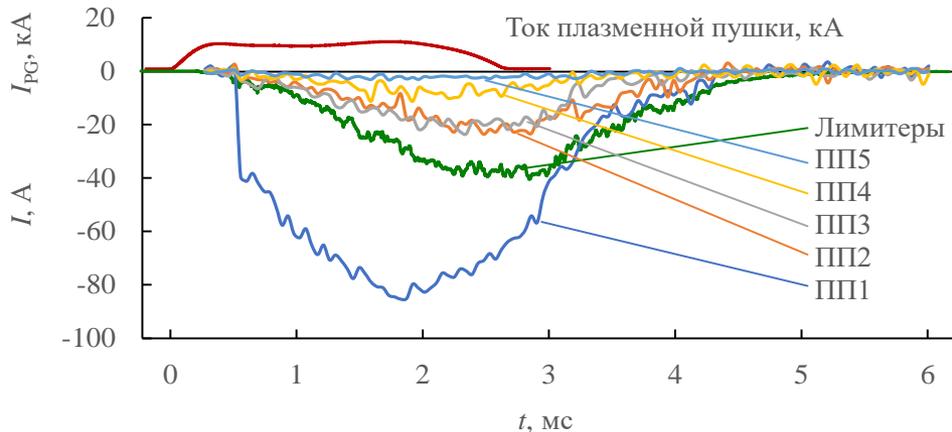
- 2021 год: начало экспериментов в проектной конфигурации установки
- программа работ в 2022 году:
 - эксперименты с соленоидальной конфигурацией секций сильного поля
 - доукомплектование систем установки и диагностических методик
 - оптимизация параметров плазмы и сценариев эксперимента

Система стабилизации плазмы в ловушке

Цель: заставить плазму вращаться в скрещенных $E_r \times B_z$ полях



Типичная динамика токов в каналах системы питания



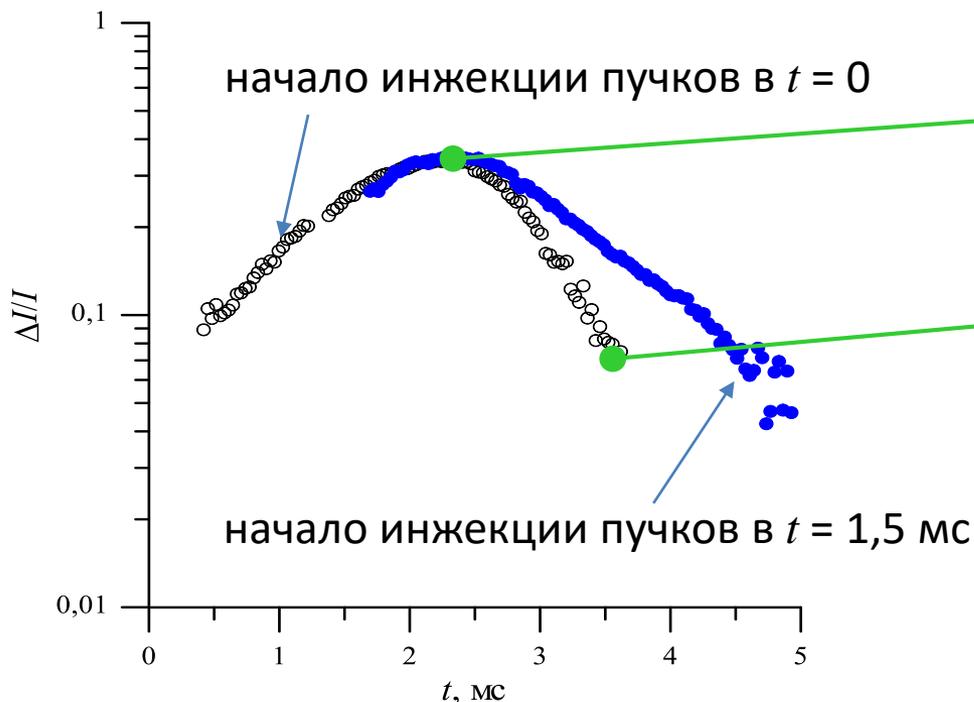
- Ток плазменной пушки приведён для масштаба по времени.
- Плазма в ловушке появляется с задержкой по времени пролёта.
- Чем больше ток на электроды, тем выше там плотность плазмы.

Инжекция нейтральных пучков

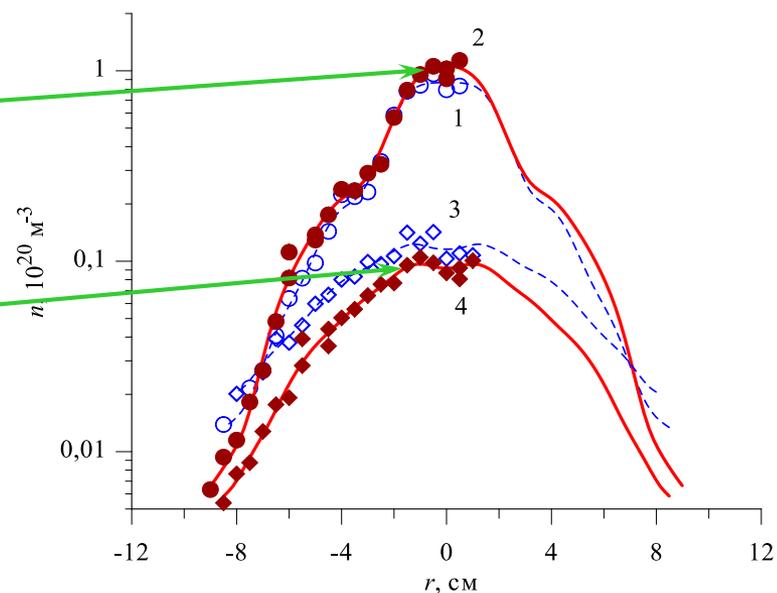
Ослабление до 40% получено при проектном поле в 4,5 Тл (в 2021 г. было 2,25 Тл)

Ослабление нагретых пучков в плазме

Радиальный профиль плотности плазмы



зондовые измерения на $z = 0,86$ м

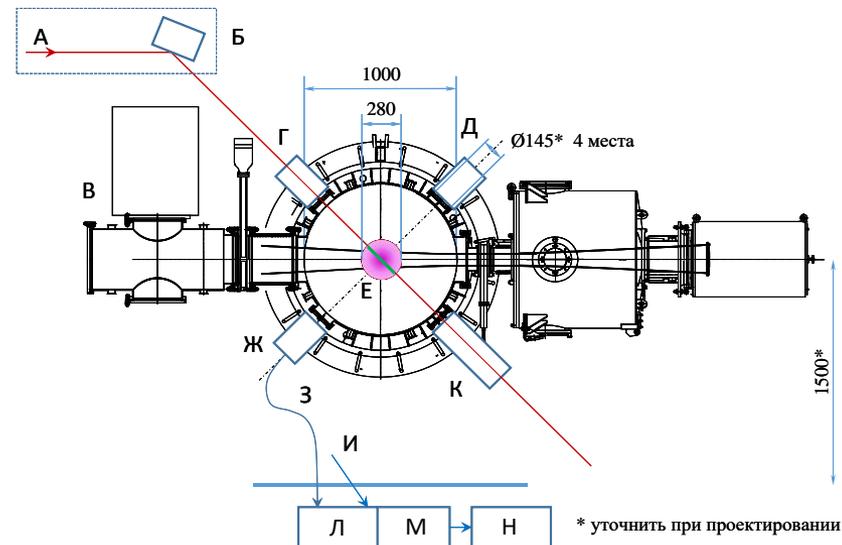


1 и 3 – только стартовая плазма
2 и 4 – она же с инъекцией пучков

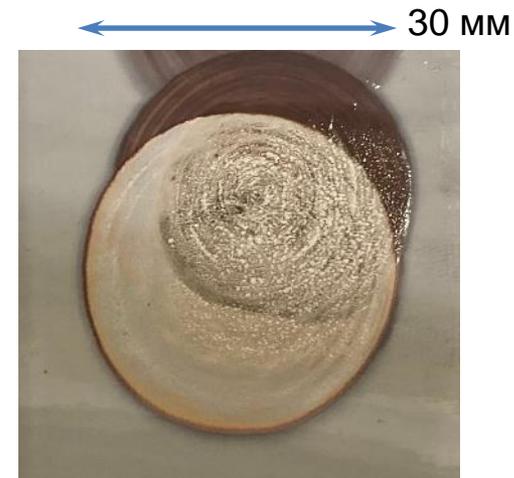
- Включение атомарной инъекции не влияет на профиль плотности во время работы плазменной пушки
- Есть небольшая деградация плотности плазмы на стадии распада.
- Сценарий с поздним включением нагрева

Система томсоновского рассеяния

- **Задача:** измерение радиального профиля температуры плазмы в одной точке по времени.
- Финансирование по Мероприятию 1.1.6 федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».
- Неодимовый лазер 15 Дж, 15 нс, 1064 нм закуплен по Программе обновления приборной базы.
- Создание системы совместно с ФТИ им. Иоффе РАН.



Лазер на площадке ГОЛ-НВ и отпечаток луча на фотобумаге



Результаты и планы

2022

- Продемонстрирована работоспособность установки ГОЛ-NB в проектной конфигурации.
- Начаты эксперименты при соленоидальном включении секций сильного поля и нагреве плазмы нейтральными пучками с $E \approx 25$ кэВ и $P_{\Sigma} > 1$ МВт.
- Подтверждается положительное влияние принудительного создания радиального электрического поля в плазме на её параметры. При нагреве плазмы не наблюдается значительного ухудшения её устойчивости.

2023

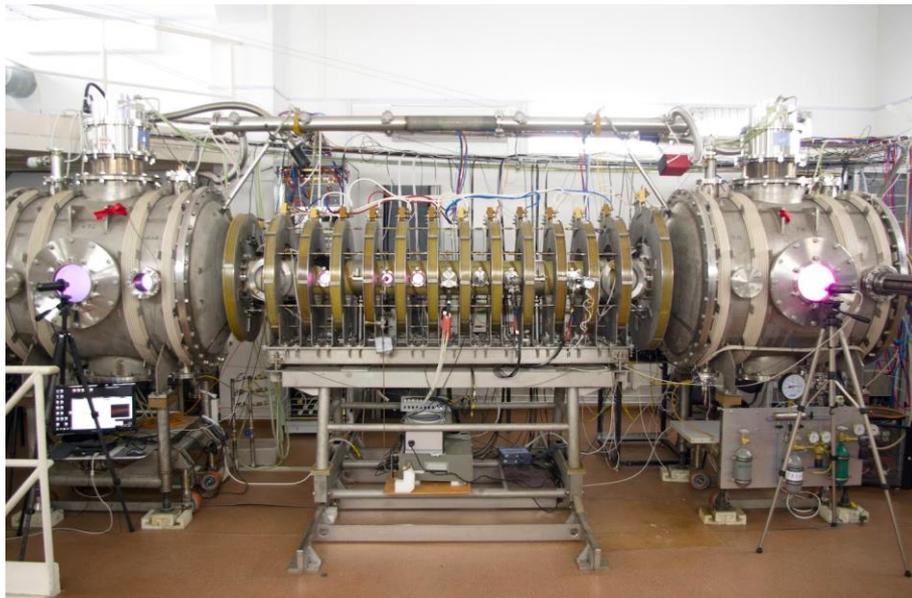
- Паспортизация «эталонного» режима работы в соленоидальной конфигурации →
- **Переход в многопробочную конфигурацию секций сильного поля.**
- Развитие диагностик и методов дополнительного нагрева плазмы.

Введение

Работы лаборатории:

- ❖ 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.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ Работы по проекту ЛИУ.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.

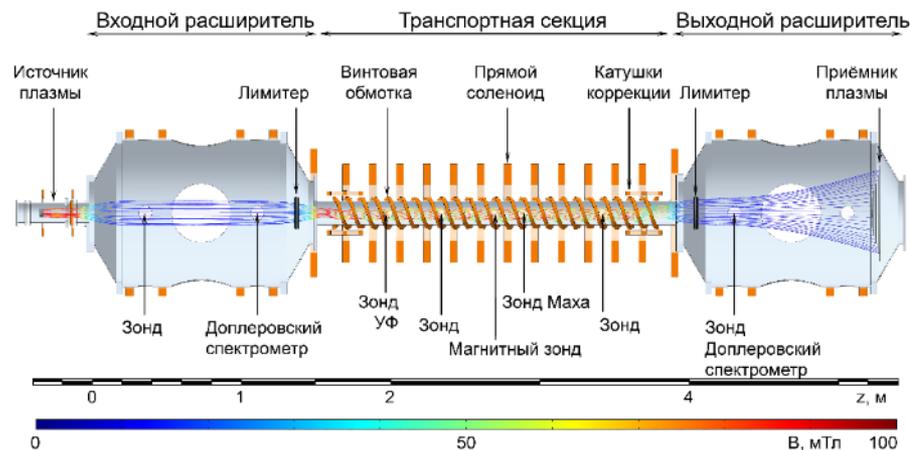
Динамическое многопробочное удержание. Установка «СМОЛА»



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 2022 году исследования были направлены на сравнение динамики плазмы при различных направлениях движения магнитных возмущений и на проверку удержания при низкой плотности.



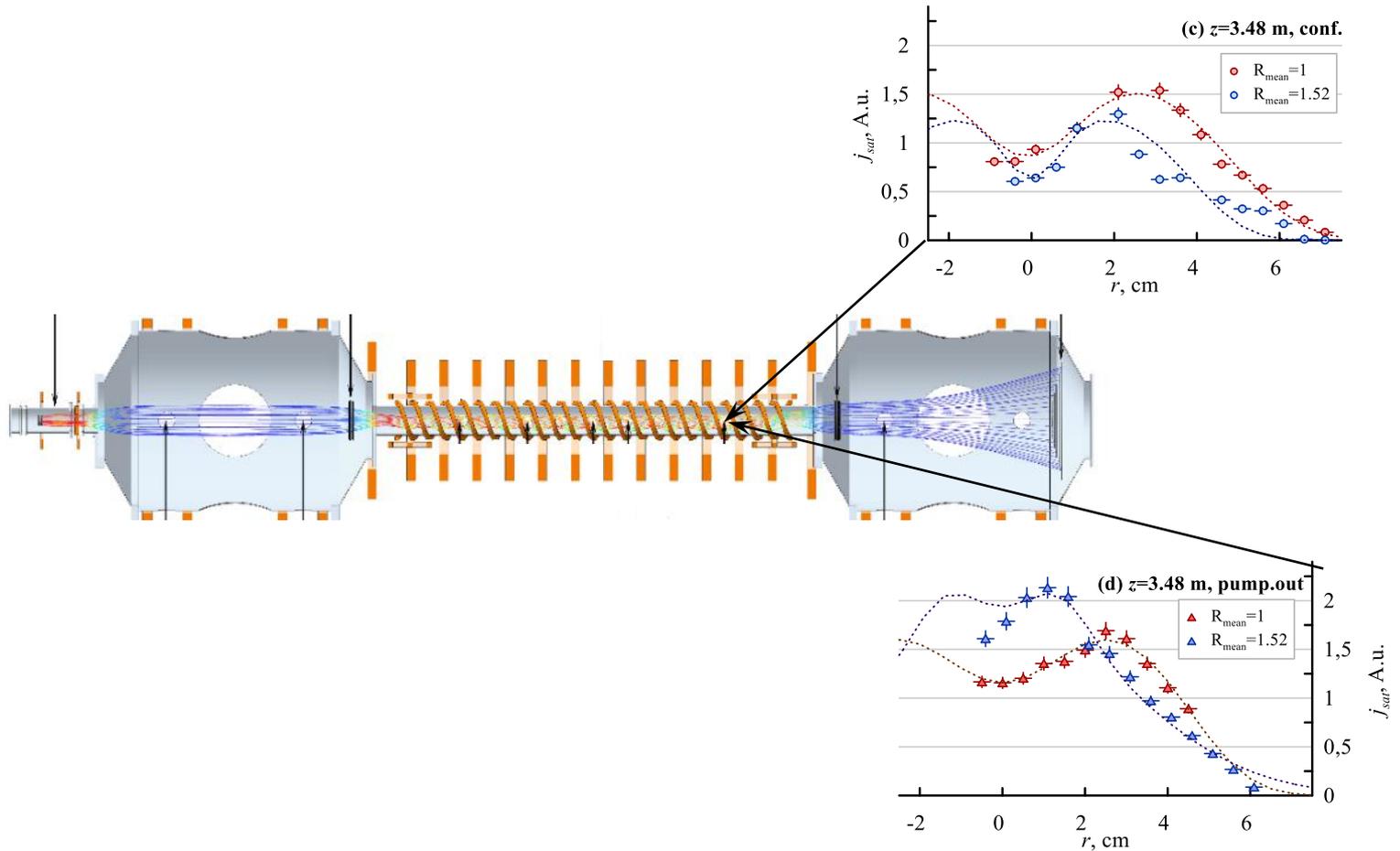
«Режим удержания»:

$$v_z \uparrow \downarrow \nabla p$$

«Режим подпитки веществом»:

$$v_z \uparrow \uparrow \nabla p$$

Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2022 года.

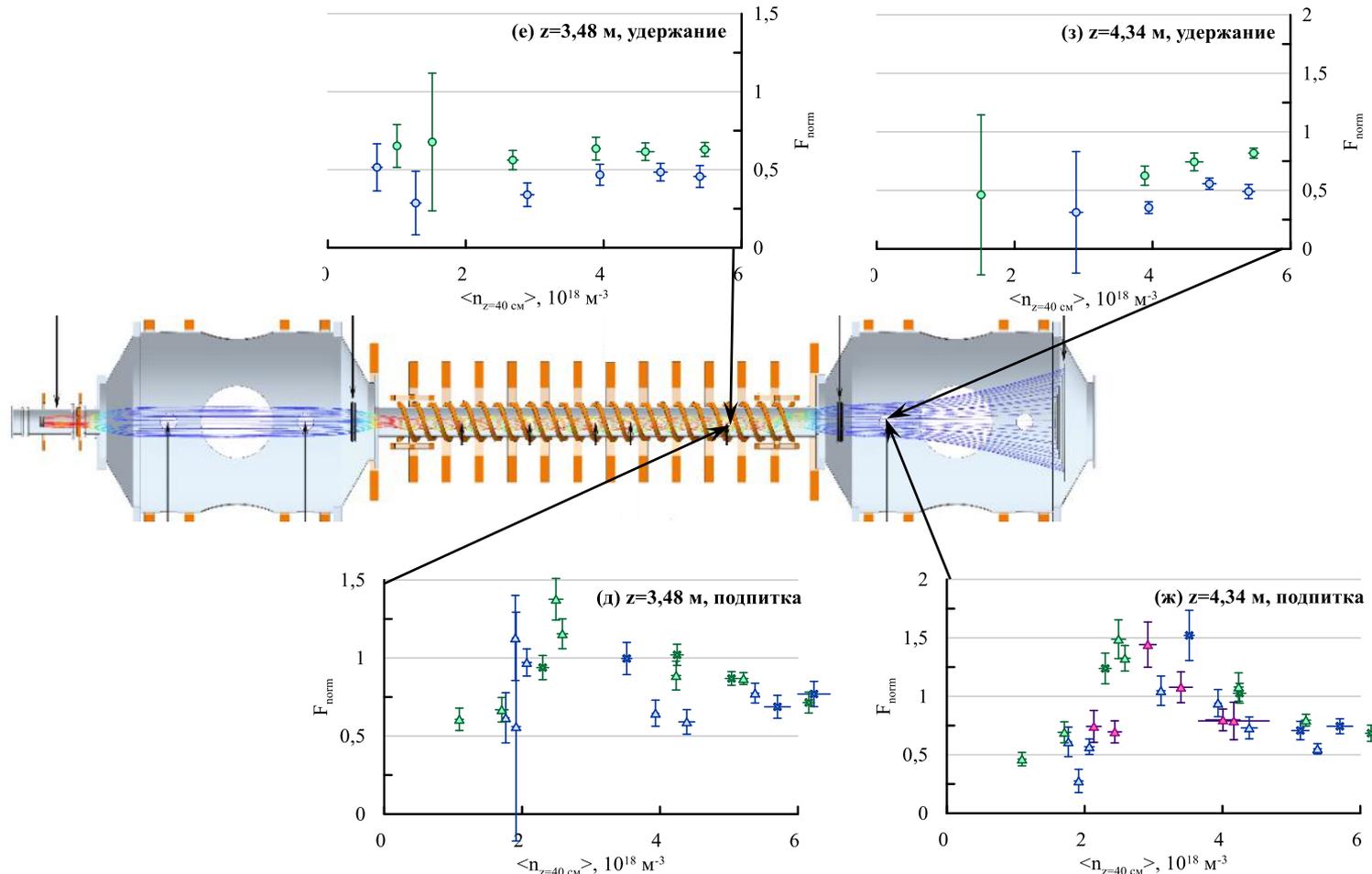


«Режим удержания»: плотность в области удержания растёт, плазменная струя сужается, плотность на выходе падает.

Соответствует теории, соответствует экспериментам 2021 года.

«Режим подпитки»: плотность в области удержания неизменна, плазменная струя сужается, плотность на выходе растёт.

Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2022 года.



В «режиме удержания» зависимости эффективности подавления от плотности плазмы не наблюдается.

(как и в экспериментах 2021 года. В теории должна падать при низкой плотности).

В «режиме подпитки» поток вещества, нормированный на плотность в области удержания, имеет максимум при $\lambda \sim 3-4 \text{ h}$.

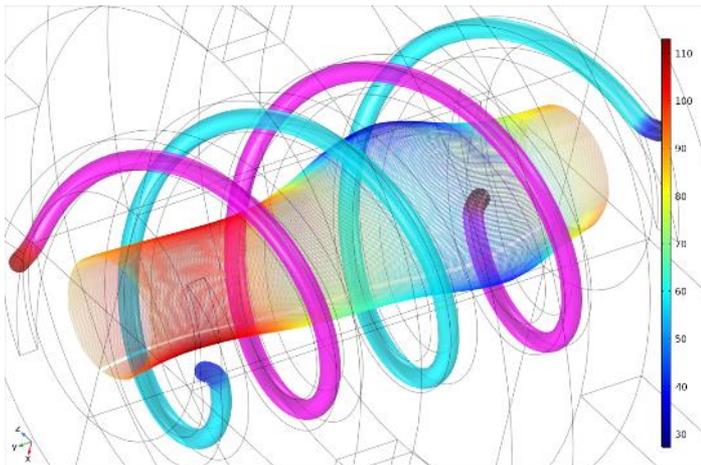
Динамическое многопробочное удержание. Планы.

Открытые вопросы:

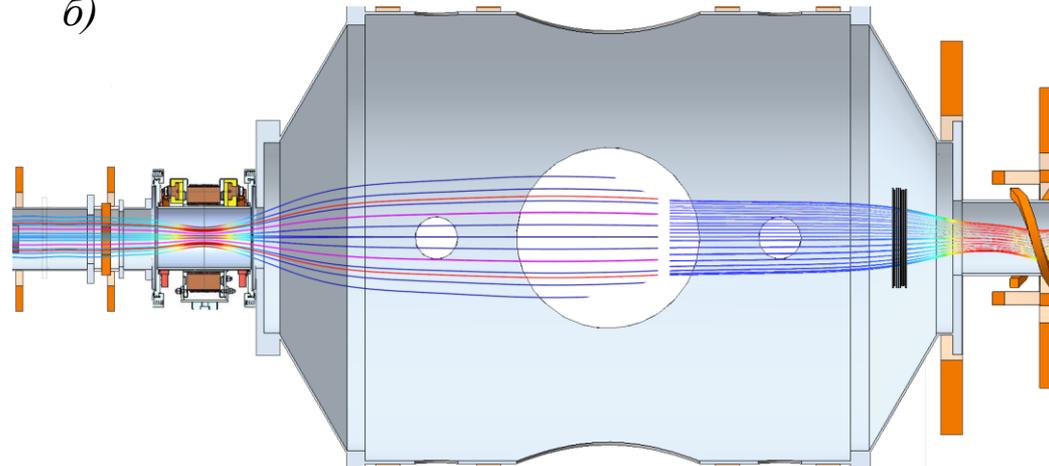
1. Улучшенное удержание вызвано аномальной столкновительностью. Как далеко можно продвинуться в область «редкой» плазмы?
На данный момент удержание не ухудшается до $\lambda \sim L$. Необходимо расширение диапазона параметров эксперимента. Достаточна ли такая столкновительность для ГДМП?
2. Как возбудить колебания для аномальной столкновительности без больших затрат энергии?
Исследование и накачка колебаний в плазме в винтовом поле. Управление радиальным электрическим полем. Эксперименты в «комбинированной» гофрировке (а).
3. Работают ли наблюдаемые механизмы аномального рассеяния без интенсивного протока плазмы?

Эксперимент с сильными пробками (б).

а)



б)



Введение

Работы лаборатории:

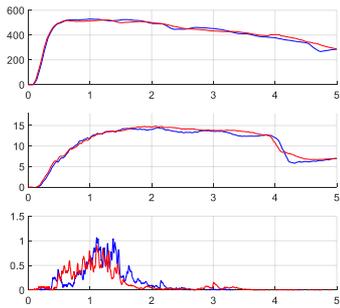
- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.
 - ❖ **Эксперимент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



Калориметрические измерения энергосодержания в микросекундном импульсе излучения

ГОЛ-ПЭТ

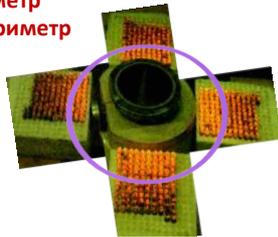
Выстрел №13813 Выстрел №13807



Выстрел №13807

В отсутствии трубы диаметр потока на входе в калориметр - 35 см

Диаметр входа в калориметр - 11.5 см



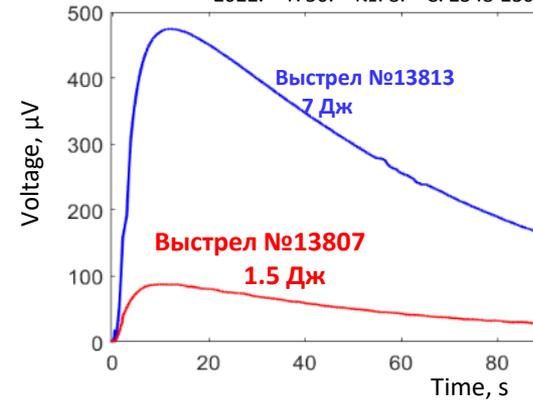
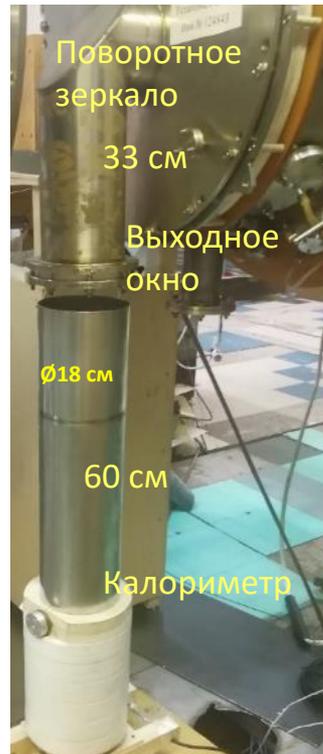
Выстрел №13813

Поток идёт по трубе $\varnothing 18$ см

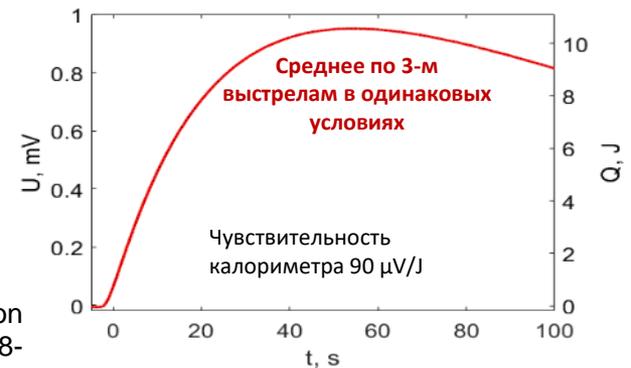


Калориметр при атмосфере, поток после 0.60 м по воздуху

Arzhannikov A. V. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2022. – Т. 50. – №. 8. – С. 2348-2363



Калориметр в вакууме после трубы длиной 2 метра

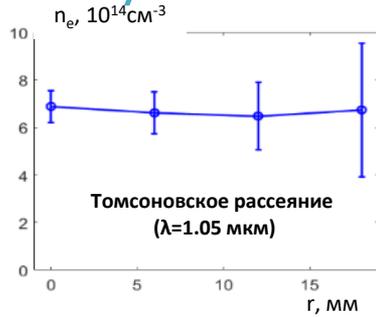


Arzhannikov A. V. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2022. Т. 50. №. 8. С. 2348-2363

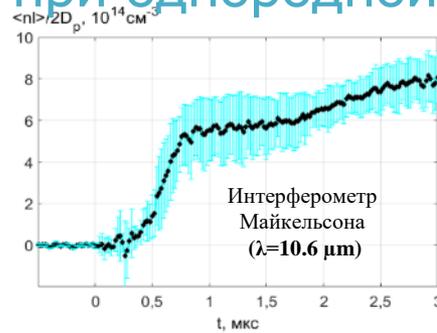


Спектр излучения, генерируемого в системе пучок-плазма при однородной плотности плазмы

ГОЛ-ПЭТ



Распределение плотности плазмы по радиусу для $t=0.8-2.2 \text{ мкс}$



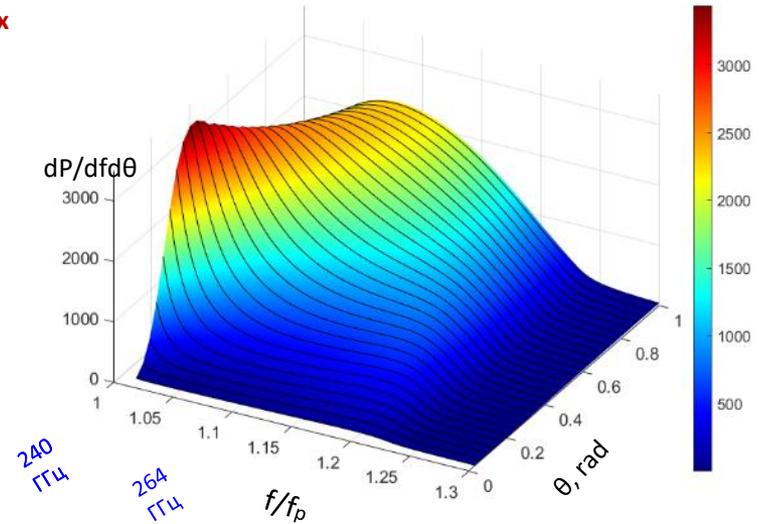
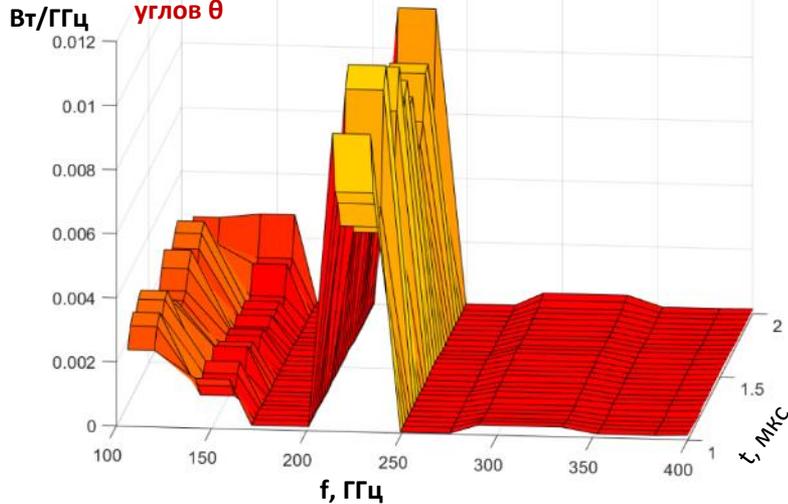
Изменения во времени средней по диаметру плотности плазмы

Параметры эксперимента

- Циклотронная $f_c = 112 \text{ ГГц}$ | $V=4 \text{ [Тл]}$
- Ленгмюровская $f_p = 239 \text{ ГГц}$ | $n=7 \cdot 10^{14} \text{ [см}^{-3}\text{]}$
- Верхнегибридная частота, до которой в эксперименте локализован максимум ЭМ излучения $f_h = 250 \text{ ГГц}$
- $f_c/f_p = 0.46$

Спектральная плотность излучения, генерируемого в однородной плазме согласно теоретической модели

Спектр излучения, зарегистрированный в эксперименте для малых углов θ

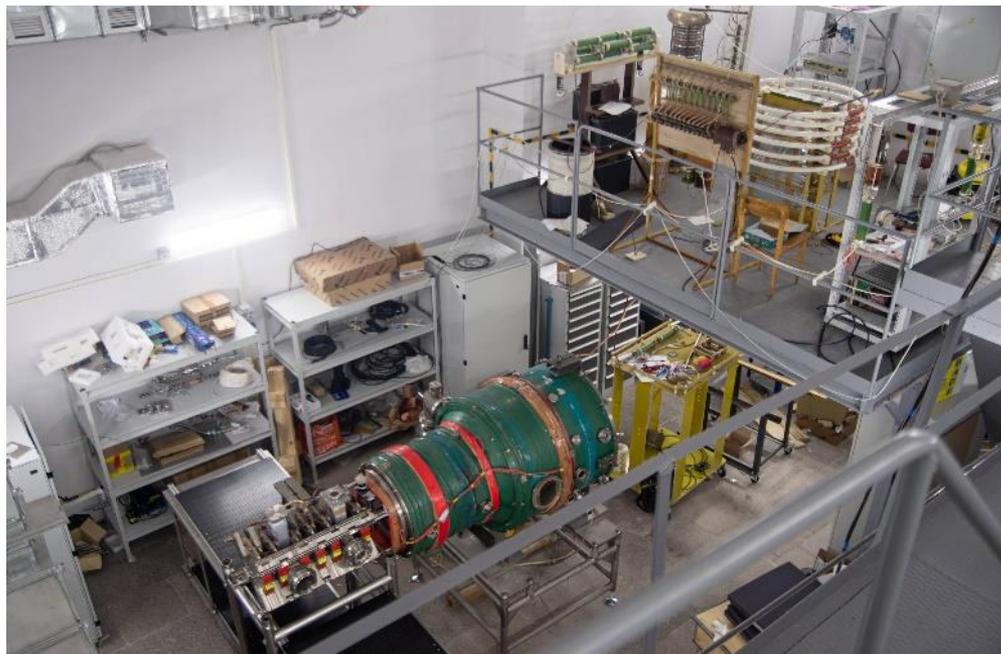


Введение

Работы лаборатории:

- ❖ 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.
 - ❖ **Взаимодействие плазмы с поверхностью.**
 - ❖ Работы по проекту ЛИУ.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.

Запуск установки БЕТА и начало экспериментов по исследованию стойкости керамических материалов к термическим ударам



Параметры генератора электронного пучка

$t = 100 - 1000$ мкс

$I = 10 - 50$ А

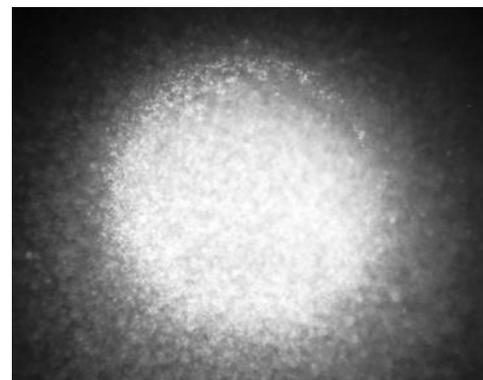
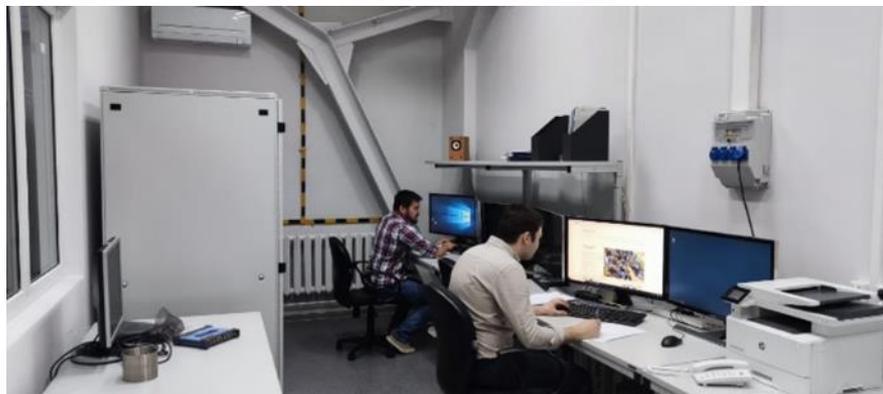
$U_{\text{ускор}} = 50 - 100$ кВ

Диаметр области
воздействия 10-20 мм

Плотность мощности на
образце до 2 МВт/см^2

← Общий вид установки БЕТА

Пультовая установки БЕТА

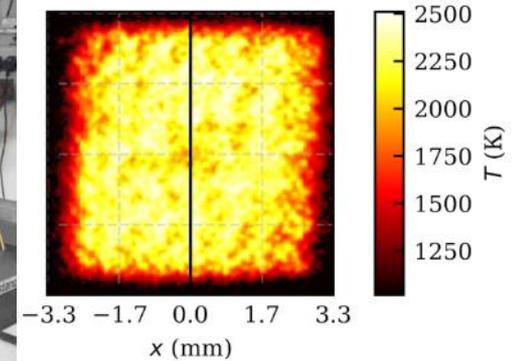
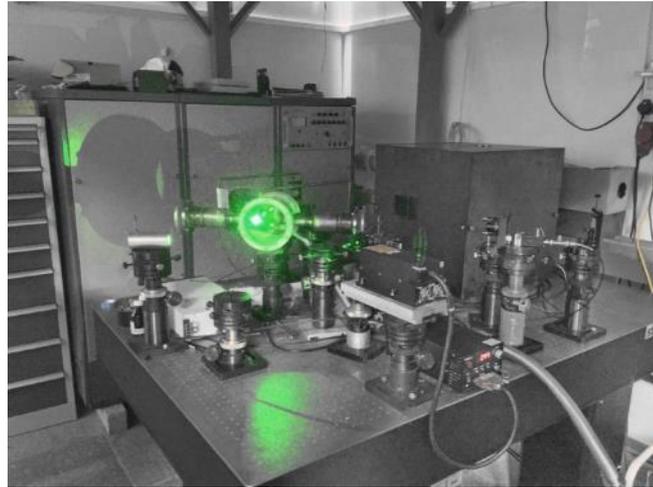


Тепловое излучения образца из карбида бора, нагреваемого импульсным электронным пучком

Расширение возможностей экспериментального моделирования термических ударов

Стенд для создания термических ударов с помощью лазера с большой энергией импульса

Стенд для обработки электронного пучка, способного работать в импульсно-периодическом режиме (совместно с 5 лабораторией).



Тепловая картина поверхности образца из карбида бора, нагреваемого лазерным излучением



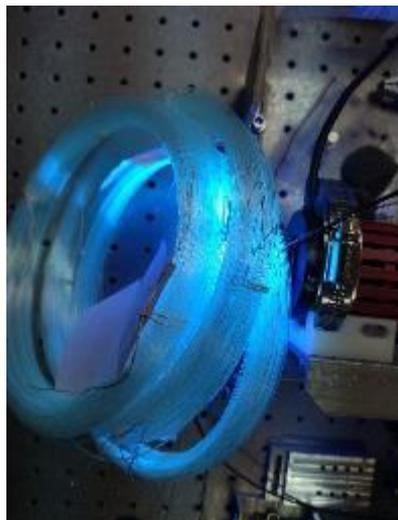
Новый мощный волоконный лазер, способный работать в непрерывном, импульсном и импульсно-периодическом режимах

Введение

Работы лаборатории:

- ❖ 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.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ **Работы по проекту ЛИУ.**
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.

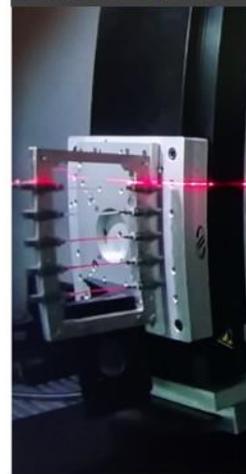
Контрактные работы выполняются по графику.



Пример импортозамещения –
быстрые волоконные
сцинтилляторы.

Тестирование при помощи СИ
на ВЭПП-4.

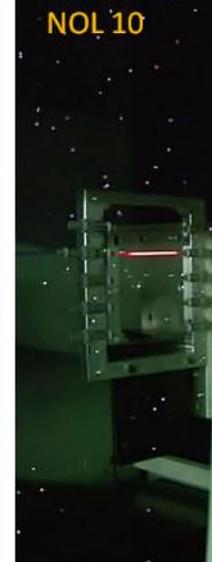
Юстировка образца в
камере станции СИ



Свечение
NOL 19

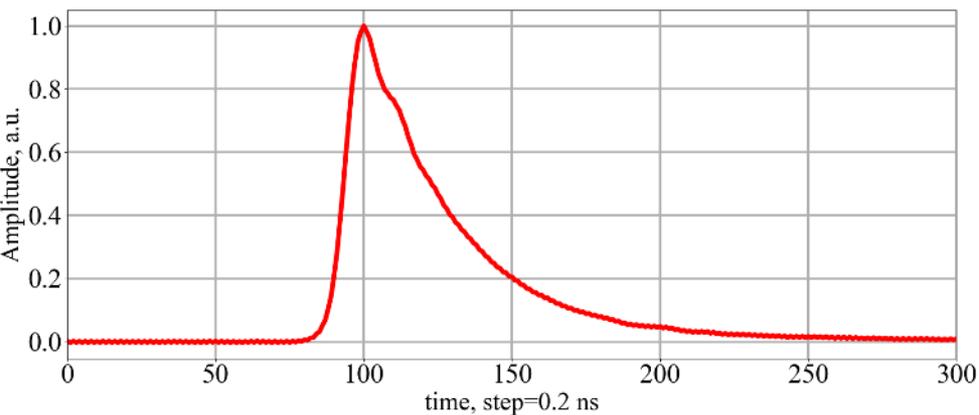


Свечение
NOL 10



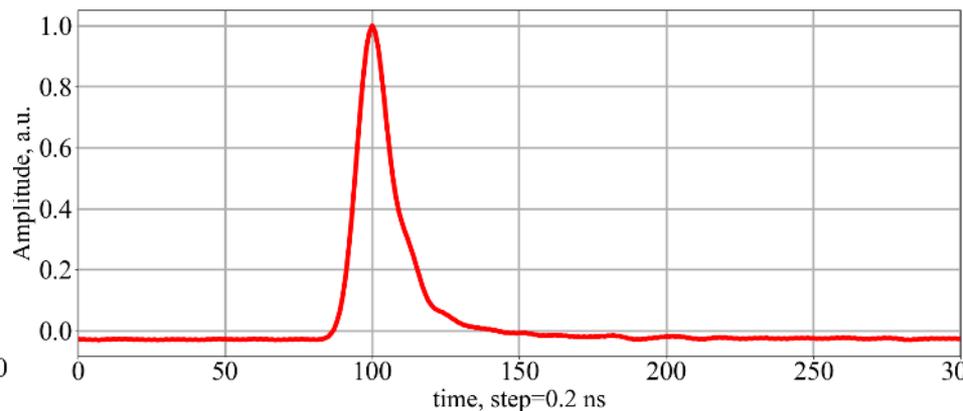
Сцинтиллятор NOL 10

$\tau_{\text{fast}} \sim 5,5 \text{ ns}$



Сцинтиллятор NOL 19

$\tau_{\text{fast}} \sim 1,5 \text{ ns}$



Введение

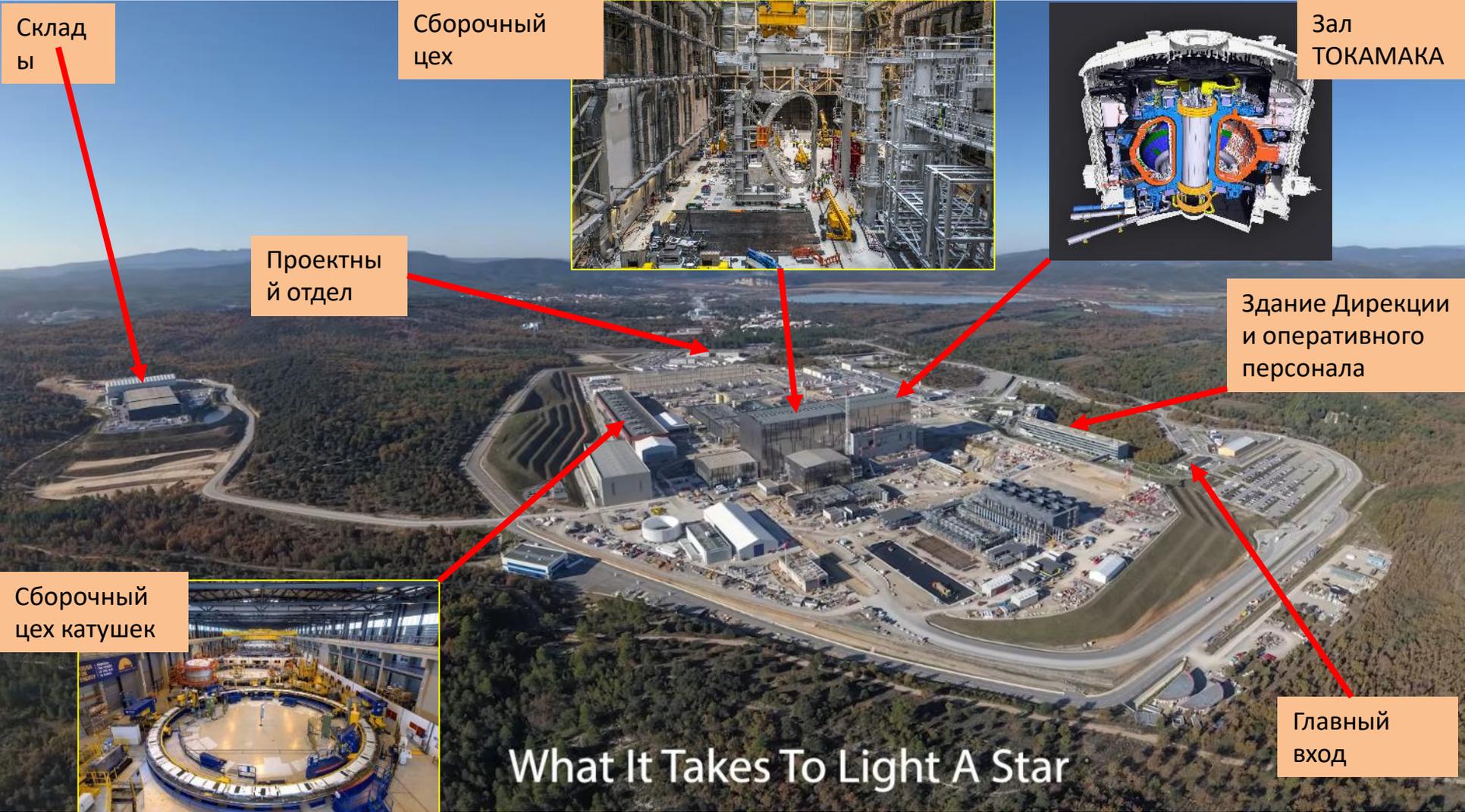
Работы лаборатории:

- ❖ 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.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью.
 - ❖ Работы по проекту ЛИУ.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР.



china eu india japan korea russia usa

What It Takes To Light A Star



Склады

Сборочный цех

Проектный отдел

Зал ТОКАМАКА

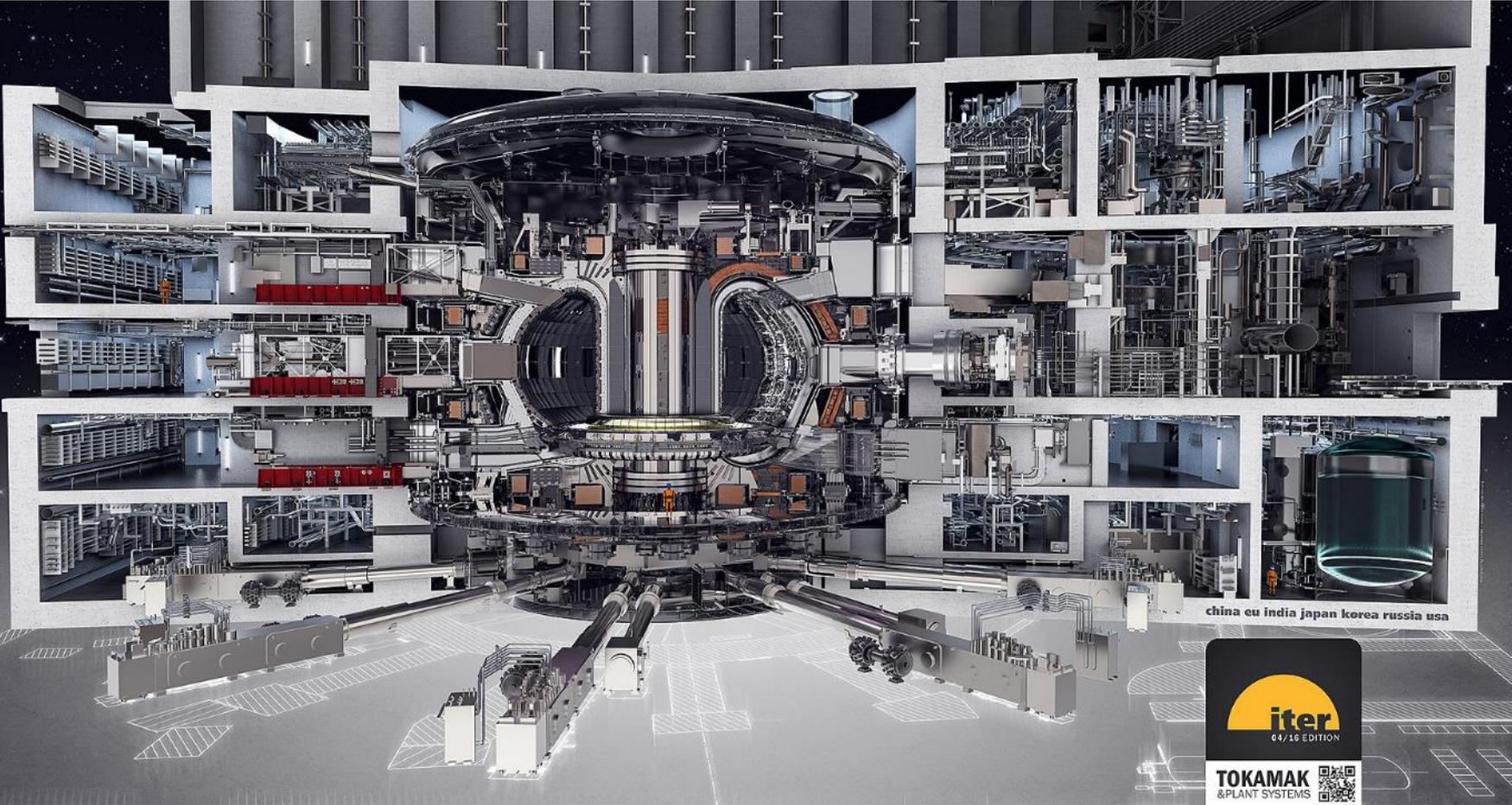
Здание Дирекции и оперативного персонала

Главный вход

Сборочный цех катушек

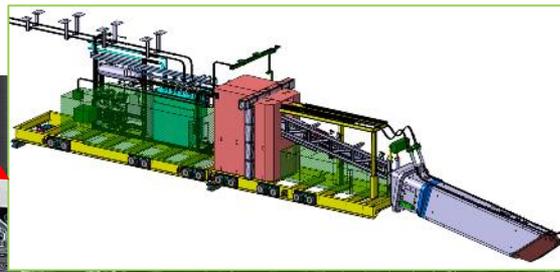
What It Takes To Light A Star

ИЯФ СО РАН ведет следующие работы по проекту ИТЭР:

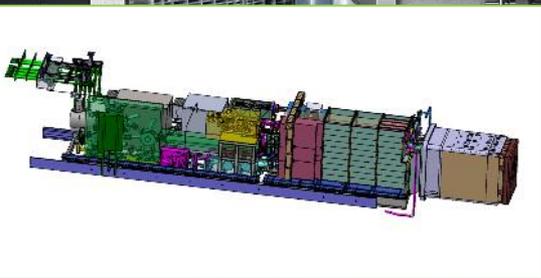
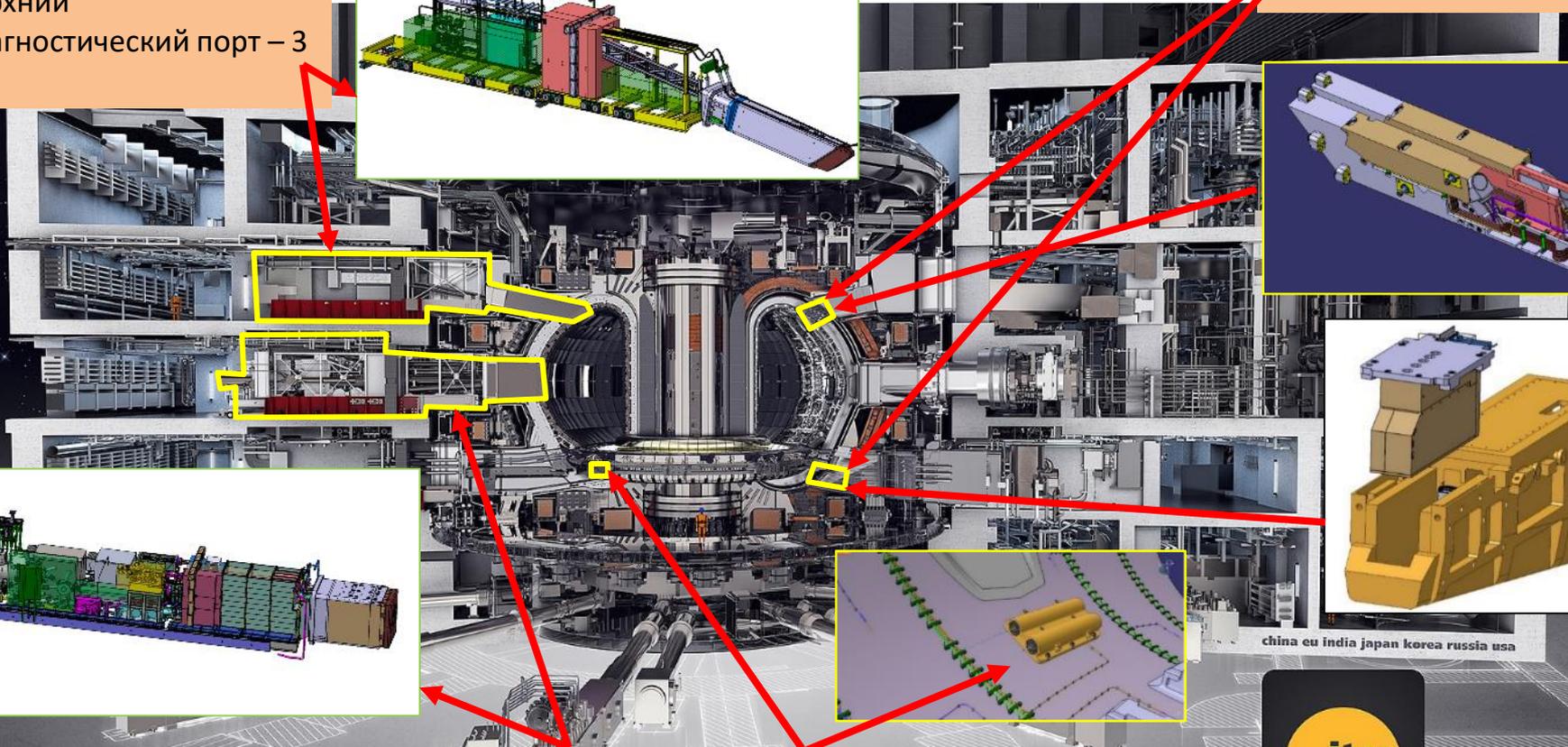
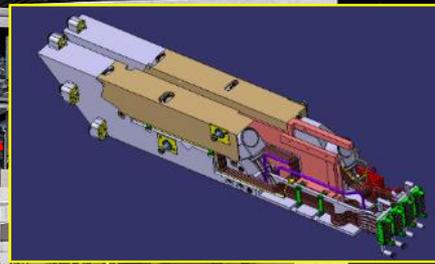


ИЯФ СО РАН ведет следующие работы по проекту ИТЭР:

Верхний
диагностический порт – 3
шт

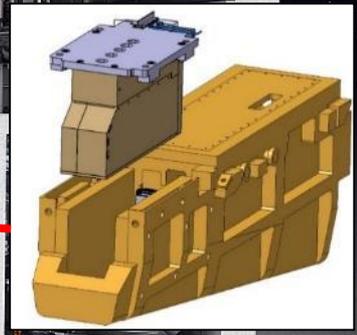
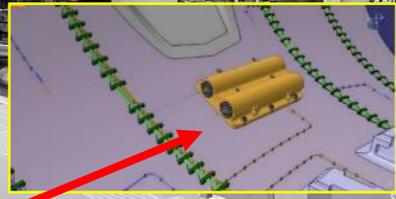


Вертикальная
нейтронная камера – 1
шт (две части)



Экваториальный
диагностический порт – 1 шт

Диверторный монитор
нейтронного потока – 3 шт



china eu india japan korea russia usa



Заключение

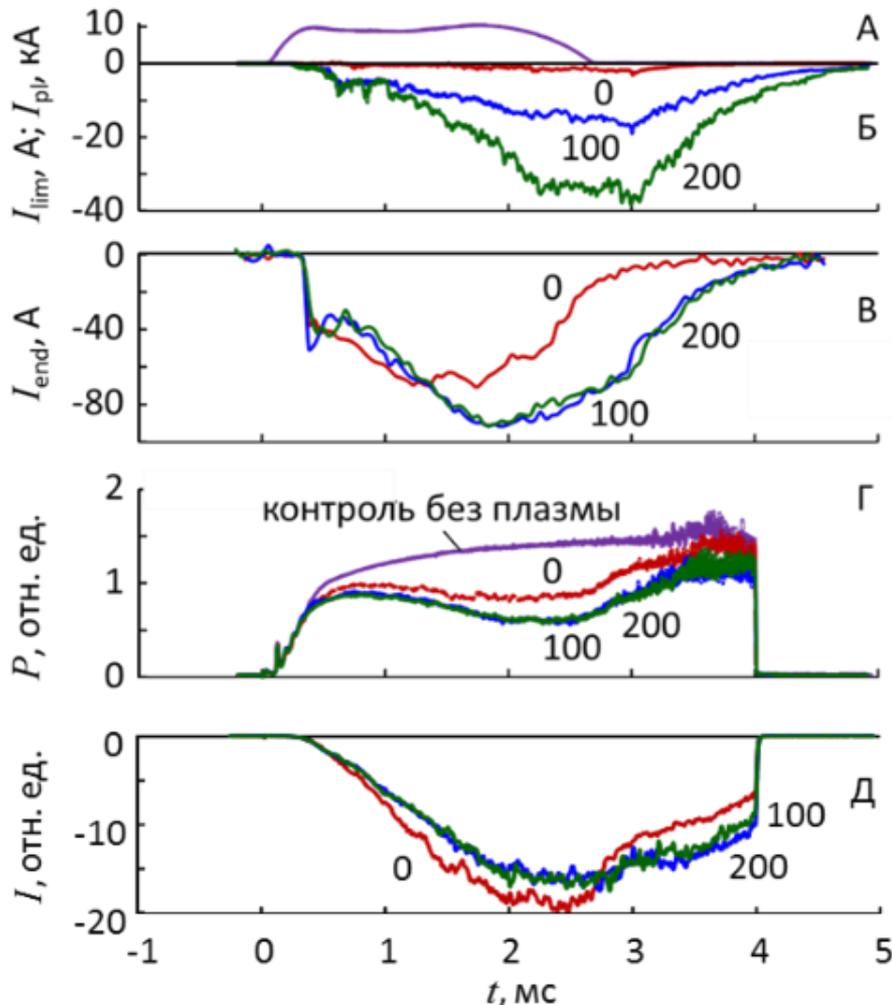
Работы лаборатории:

- ❖ Развитие физики многопробочного удержания.
 - ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ. В 2023 году переход в многопробочную конфигурацию.
 - ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка. Изучение аномальной столкновительности (возможность работы при термоядерных параметрах).
- ❖ Разработка мощных электронных пучков, изучение их взаимодействия с плазмой и поверхностью и генерация электромагнитного излучения.
 - ❖ Эксперимент ГОЛ-ПЭТ, взаимодействие мощных пучков с плазмой. Получены новые интересные результаты по генерации субтерагерцового излучения в системе плазма+РЭП.
 - ❖ Взаимодействие плазмы с поверхностью. Экспериментальные возможности установки БЕТА расширяются – эксперименты с лазерным нагревом и новый электронный пучок.
 - ❖ Работы по проекту ЛИУ. Работы выполняются по плану.
- ❖ Физика и технологии термоядерного реактора: Участие в разработке проекта Международного Экспериментального Термоядерного Реактора ИТЭР. Работы выполняются по плану.

Спасибо за внимание!

Режимы с улучшенным удержанием

Влияние потенциалов, поданных на лимитеры, на параметры плазмы в ловушке



← ток разряда в плазменной пушке

← суммарный ток двух лимитеров

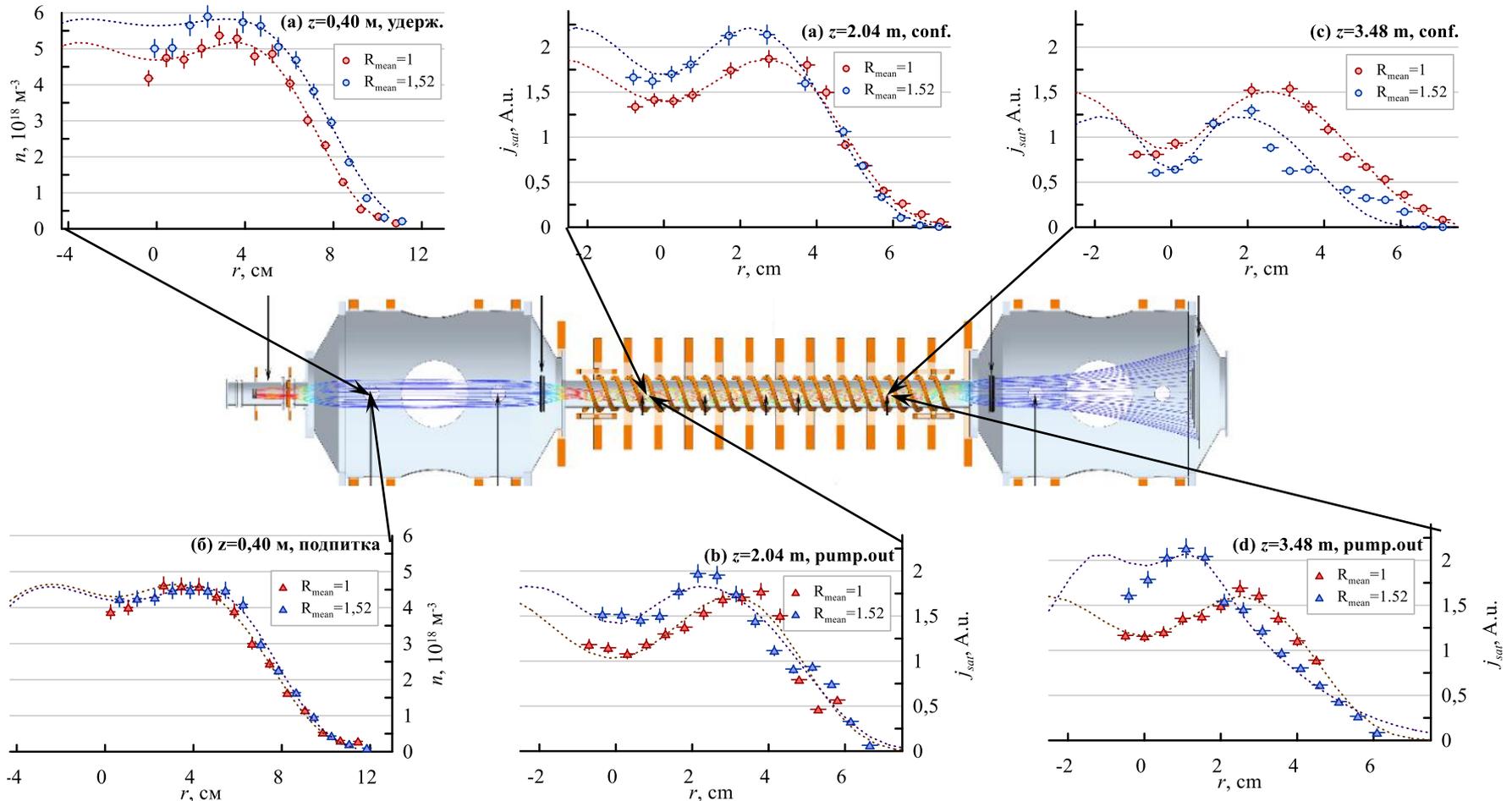
← ток центральной секции выходного плазмоприёмника

← плотность тока нагревного пучка, прошедшего сквозь вакуумную камеру и контроль без плазмы

← поток нейтралов перезарядки в канале 25 кэВ

→ **вывод: есть пороговое значение напряжения, выше которого удержание улучшается**

Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2022 года.

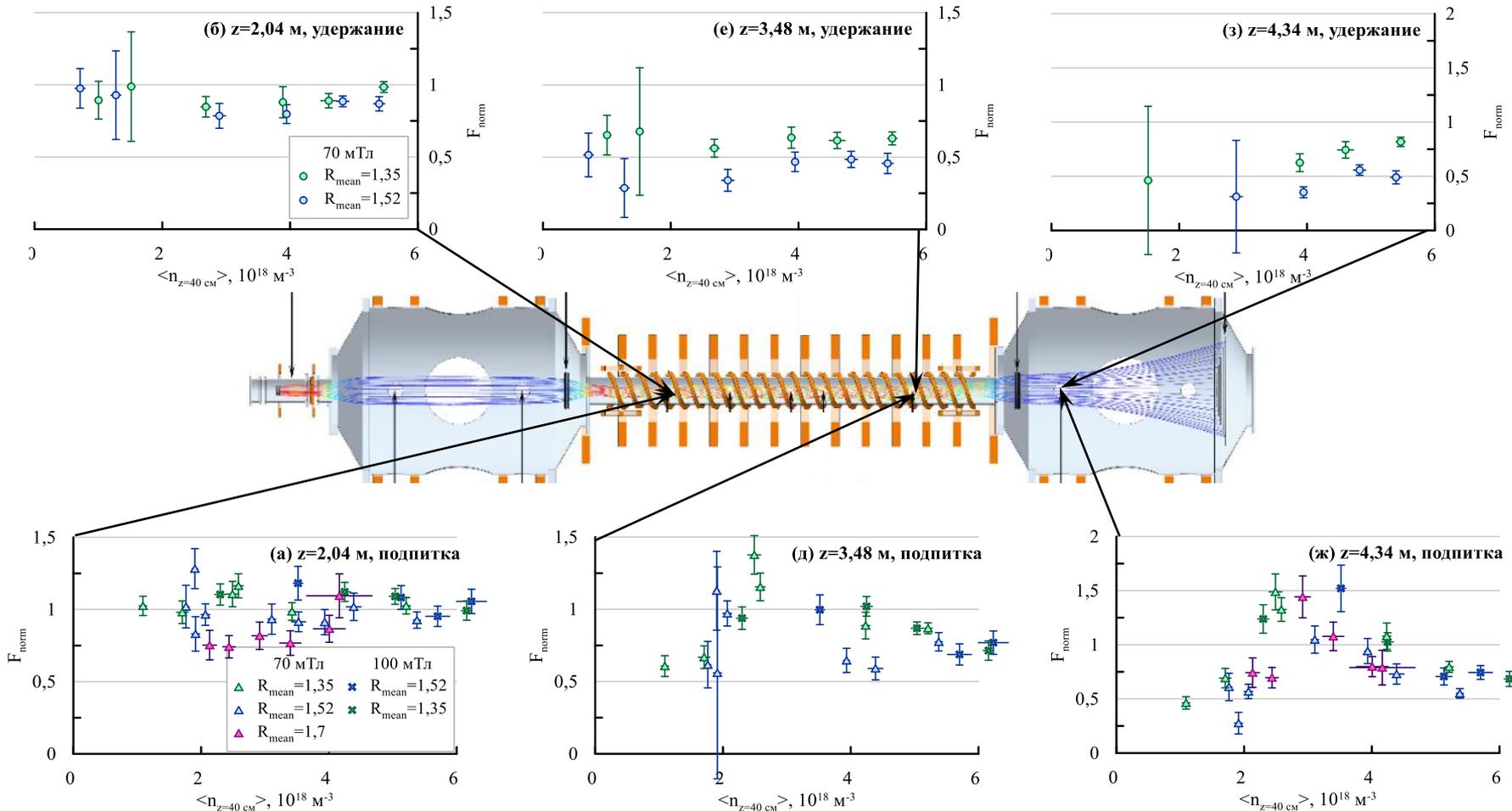


«Режим удержания»: плотность в области удержания растёт, плазменная струя сужается, плотность на выходе падает.

Соответствует теории, соответствует экспериментам 2021 года.

«Режим подпитки»: плотность в области удержания неизменна, плазменная струя сужается, плотность на выходе растёт.

Динамическое многопробочное удержание. Результаты 2022 года.



В «режиме удержания» зависимости эффективности подавления от плотности плазмы не наблюдается.

(как и в экспериментах 2021 года. В теории должна падать при низкой плотности).

В «режиме подпитки» поток вещества, нормированный на плотность в области удержания, имеет максимум при $\lambda \sim 3-4 h$.

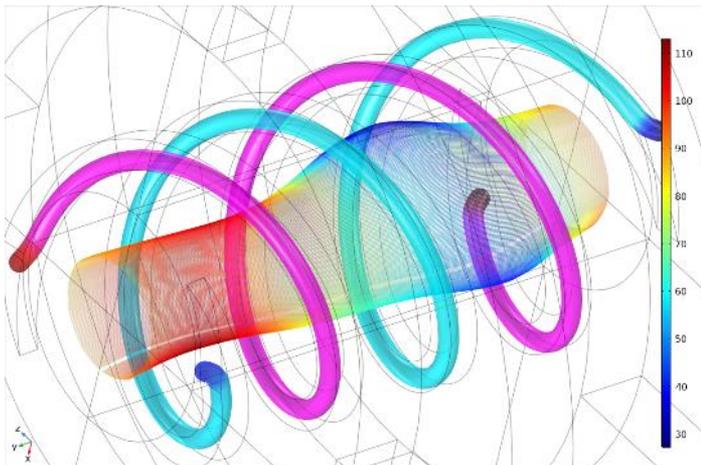
Динамическое многопробочное удержание. Планы.

Открытые вопросы:

1. Улучшенное удержание вызвано аномальной столкновительностью. Как далеко можно продвинуться в область «редкой» плазмы?
На данный момент удержание не ухудшается до $\lambda \sim L$. Необходимо расширение диапазона параметров эксперимента. Достаточна ли такая столкновительность для ГДМП?
2. Как возбудить колебания для аномальной столкновительности без больших затрат энергии?
Исследование и накачка колебаний в плазме в винтовом поле. Управление радиальным электрическим полем. Эксперименты в «комбинированной» гофрировке (а).
3. Работают ли наблюдаемые механизмы аномального рассеяния без интенсивного протока плазмы?

Эксперимент с сильными пробками (б).

а)



б)

