

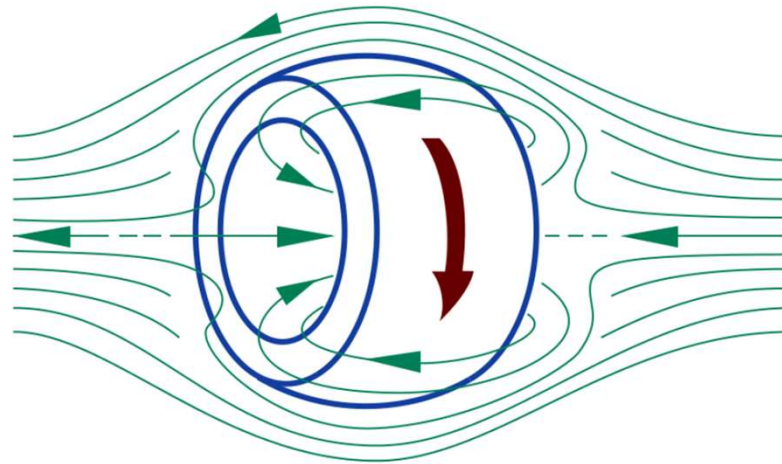


Plasma In CAT

# Установка САТ

## Статус и планы исследований

С.Мурахтин и команда



## План доклада

---

- Проект КОТ.
- Цели и задачи.
- Текущее состояние дел.
  - Магнитная система.
  - Генератор плазмы.
  - Система атомарной инжекции.
  - Система автоматизации и сбора данных.
- Экспериментальная программа.
  - Генерация стартовой плазмы. Зондовые измерения, торцевой энергоанализатор.
  - Накопление азимутального тока. Энергетическое распределение нейтралов перезарядки, диамагнитные измерения. MSE-LIF.
- Выводы.

## Проект КОТ

---

- В конце 2021 года в ИЯФ состоялся физический пуск новой экспериментальной установки КОТ (компактный осесимметричный тороид или САТ - Compact Axisymmetric Toroid). Программа исследований специально ориентирована на изучение удержания горячей плазмы с высоким относительным давлением  $\beta \sim 1$  в осесимметричном пробкотроне малого объема с мощной атомарной инжекцией, демонстрацию диамагнитного удержания и возможного обращения поля.
- Простота конструкции, принципиальная возможность удержания плазмы с высоким значением  $\beta$ , наличие естественного канала удаления примесей и продуктов термоядерных реакций, возможность прямого преобразования тепловой энергии плазмы в электричество всё это является привлекательными моментами данной экспериментальной программы.

Установка КОТ. Защищённый зал здание 20.



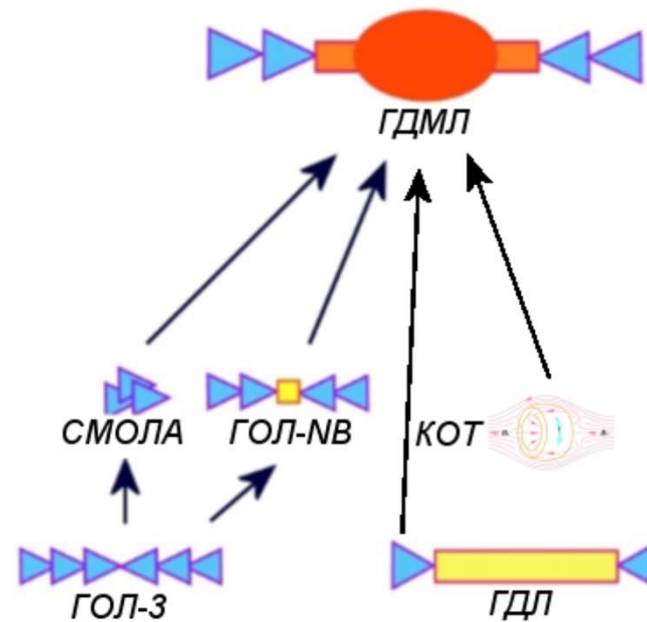
## Цели и задачи

---

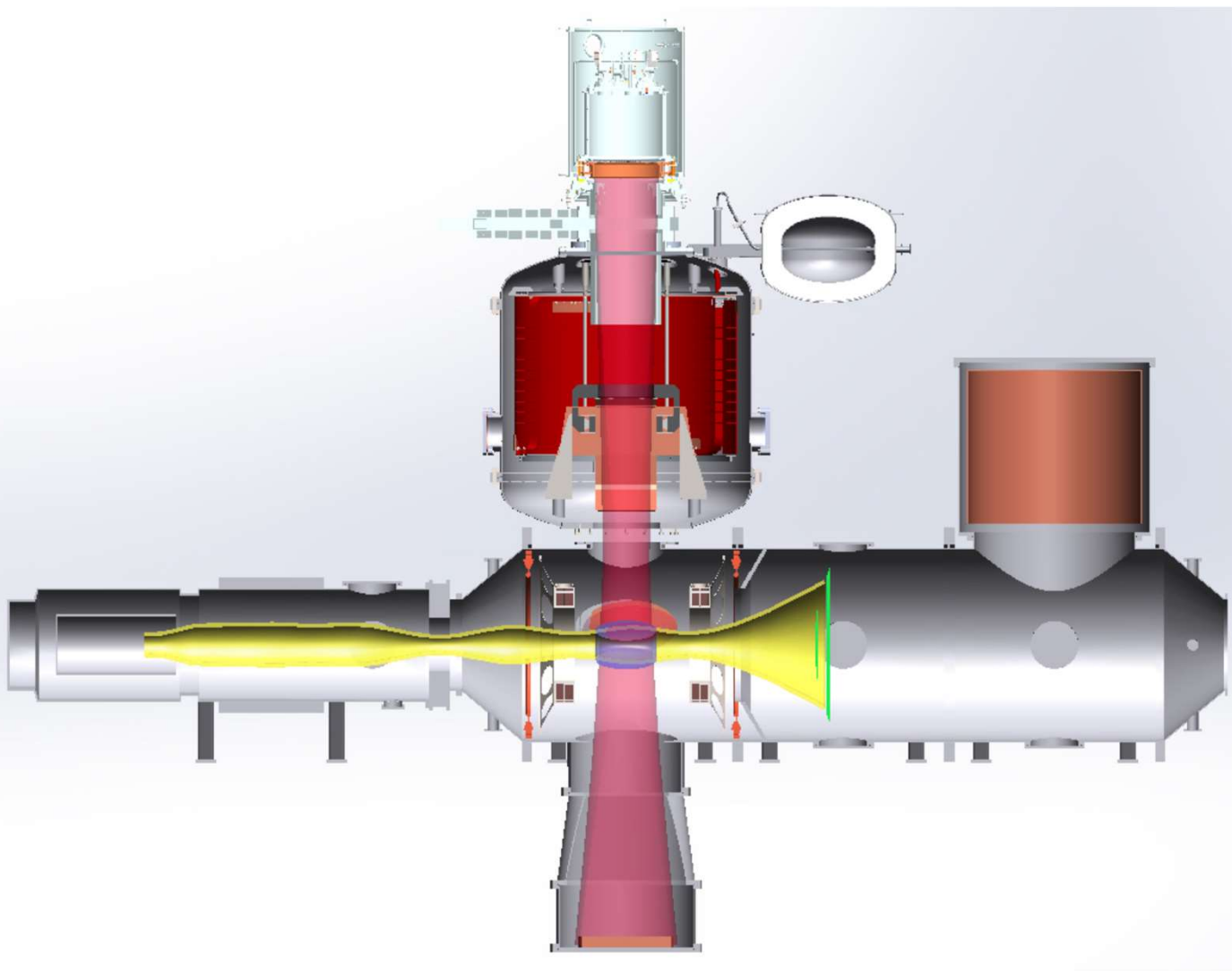
- Один из поддерживающих экспериментов для проекта ГДМЛ.
- Формирование и стабилизация плазмоида с  $\beta \approx 1$ .
- В рамках данной работы будет использоваться МГД-стабилизация с помощью вихревого удержания, эффектов конечного ларморовского радиуса, замороженность магнитного поля в плазменную пушку, а также будут развиты методы стабилизации проводящей стенкой.
- Исследование кинетических неустойчивостей (КДН, АИЦН).

## Дорожная Карта термоядерных исследований в ИЯФ

- Установка **ГДМЛ** - демонстратор технологий УТС на основе открытой ловушки.
- Установка **ГОЛ-NB** – проверка работы многопробочных секций и механизмов стабилизации.
- Установка **СМОЛА** – проверка перспективного принципа снижения продольных потерь.
- Установка **КОТ** – реверс поля, диамагнитное удержание, отработка методов МГД-стабилизации.



## Экспериментальная установка



### Габариты установки:

Длина – 6 м.

Высота - 5 м.

Диаметр камеры – 1 м.

Межпробочное расстояние – 0.6 м.

$B_0$  – 2 кГс.

Пробочное отношение – 2.

### Мишенная плазма:

$r_0=10$  см,  $n_0=3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e=30-50$  эВ.

### Система атомарной инжекции:

2 инжектора на энергию 15 кэВ.

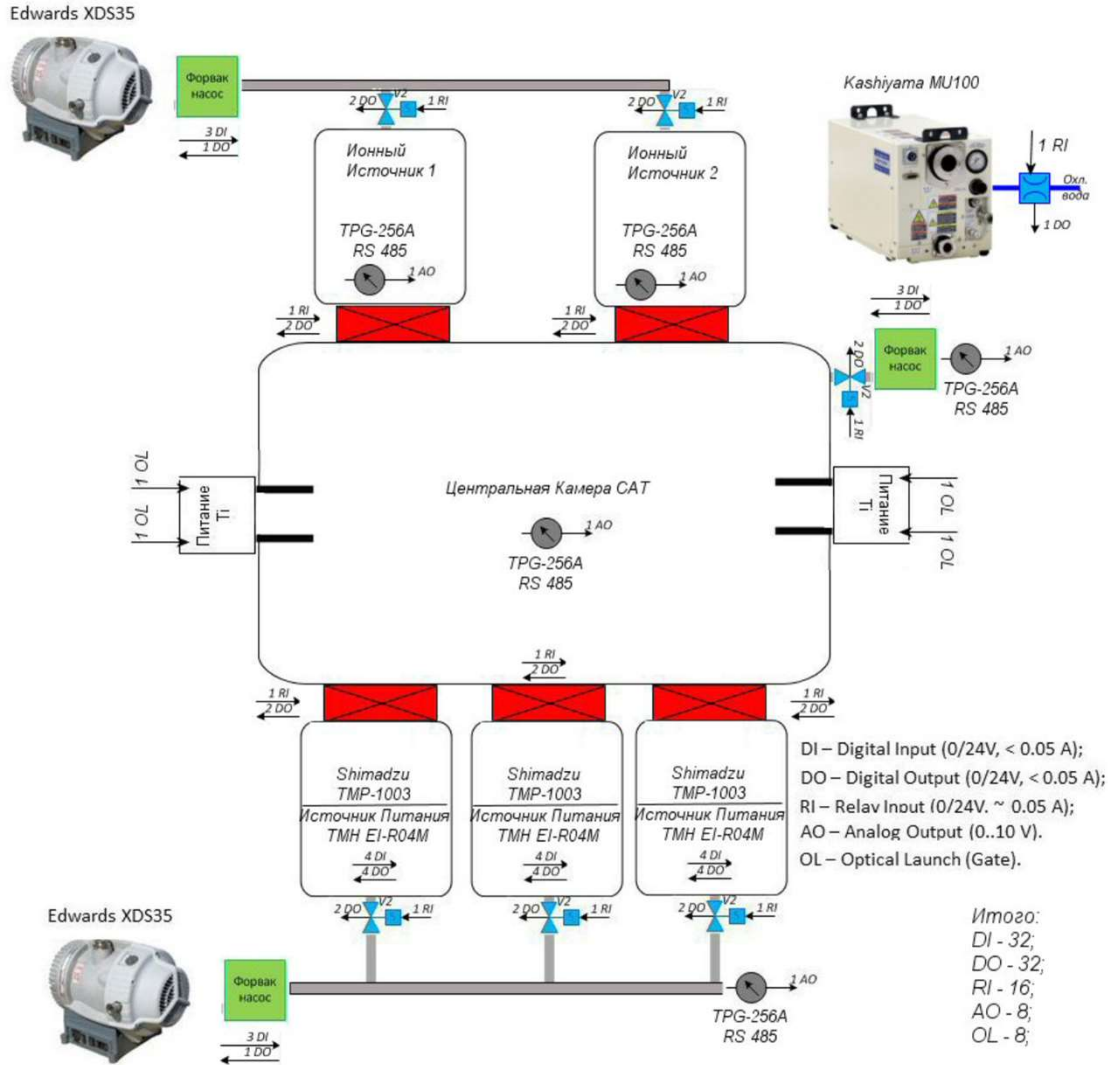
Мощность – 2х2 МВт.

Ток – 2х160 А.

Плотность тока в плазме –  $3.5 \text{ А/см}^2$   
(2ХИВ –  $1.6 \text{ А/см}^2$ ).



# Вакуумная система КОТ

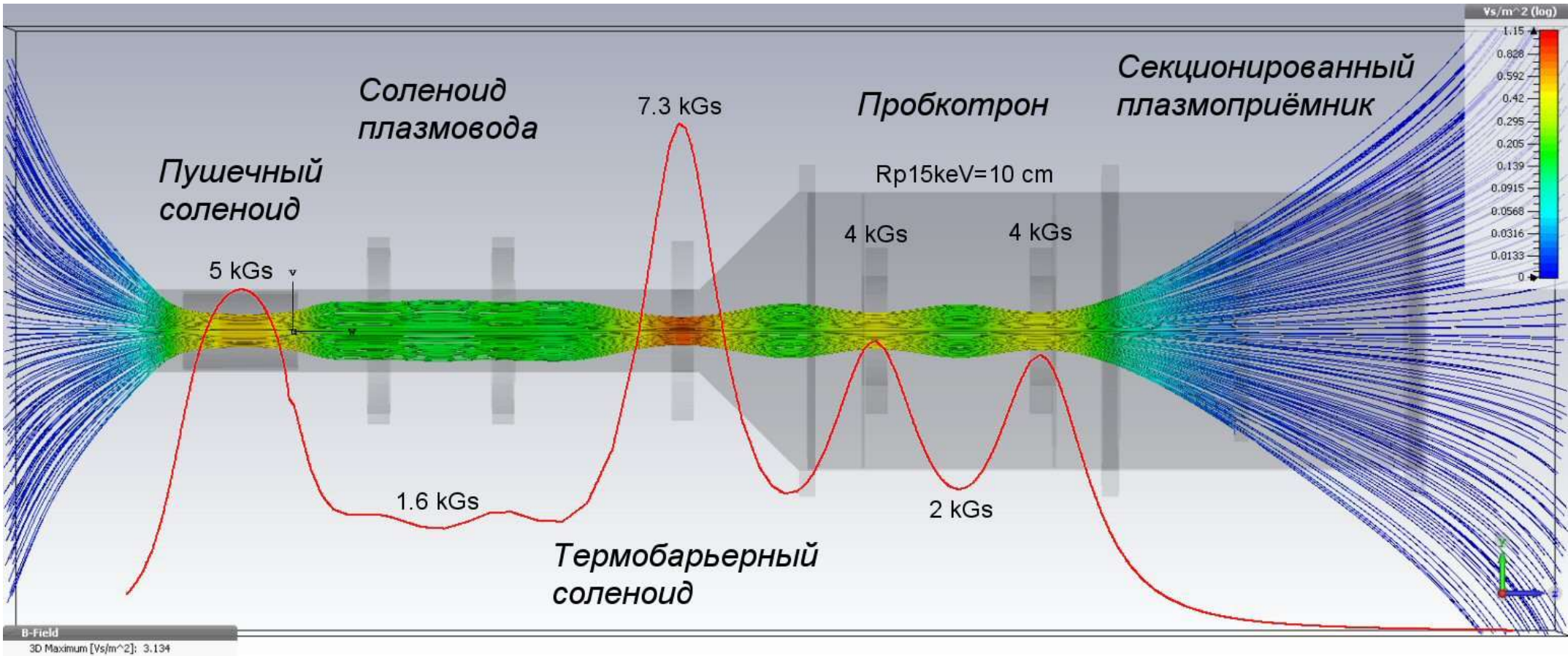


Получен вакуум  $10^{-5}$  Па (без Ti)

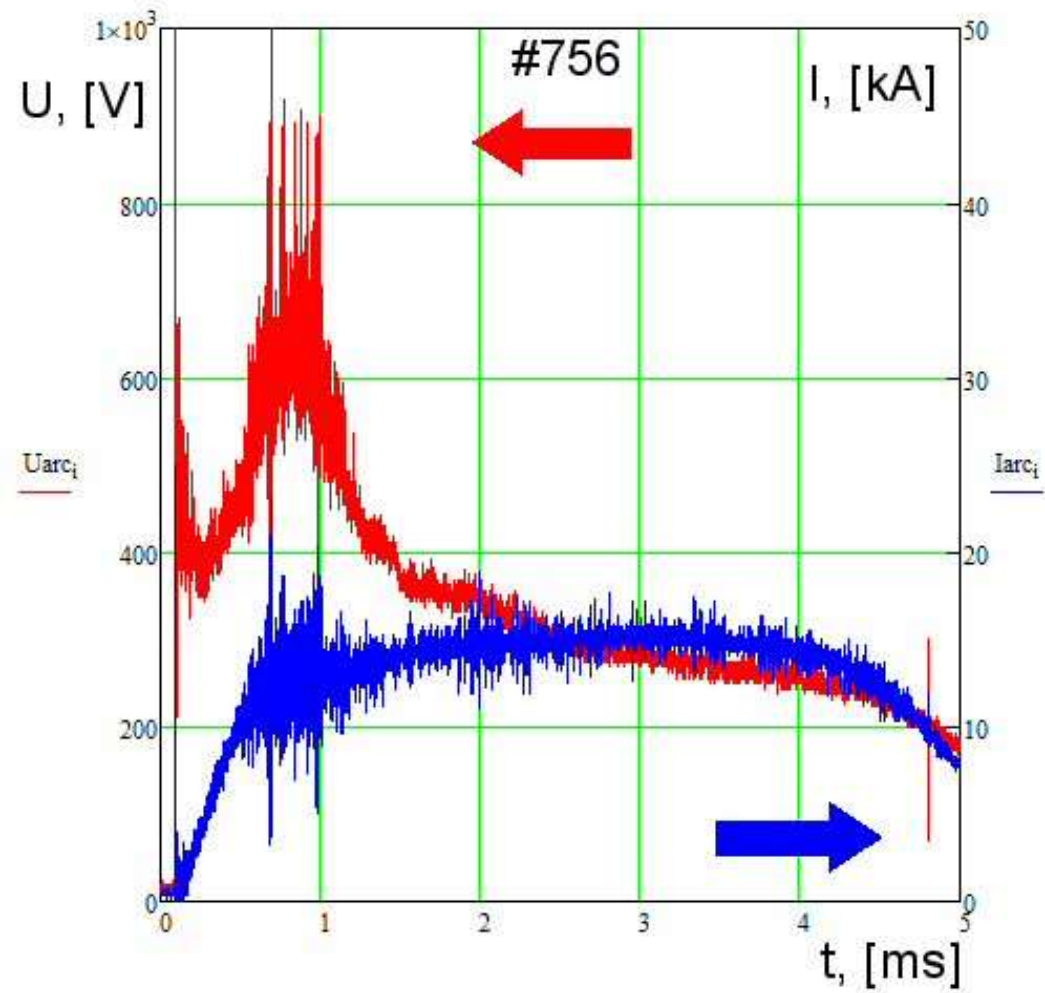


Необходимо:  
В производстве 3+2 комплекта  
испарителей.

# Магнитная система КОТ

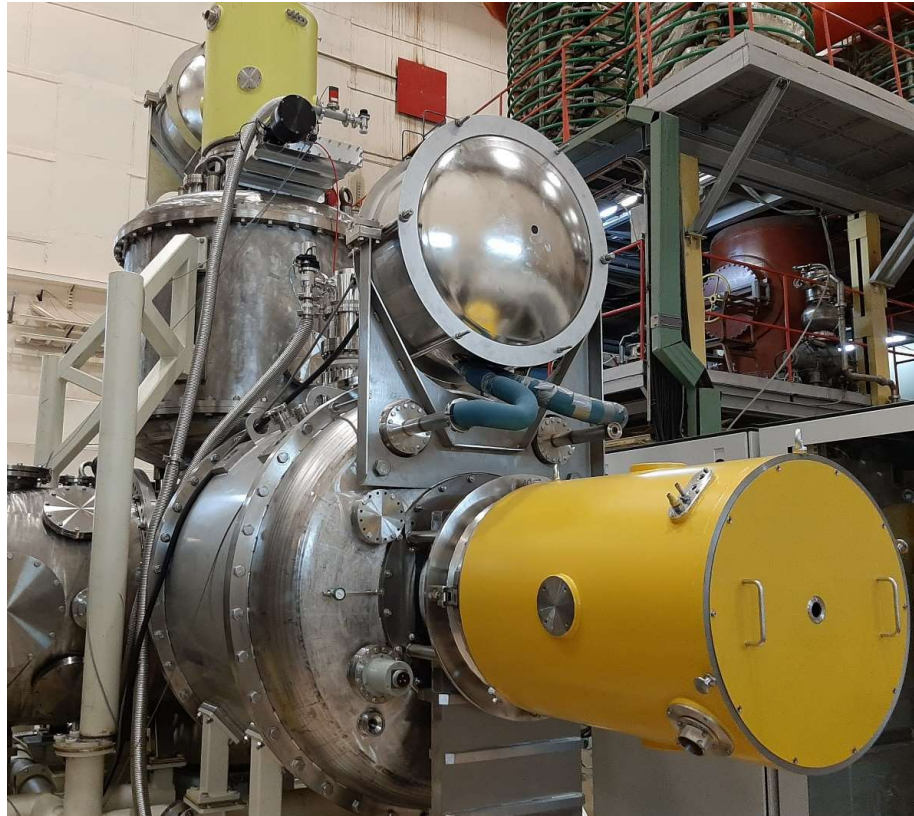


## Генератор плазмы с кольцевым каналом

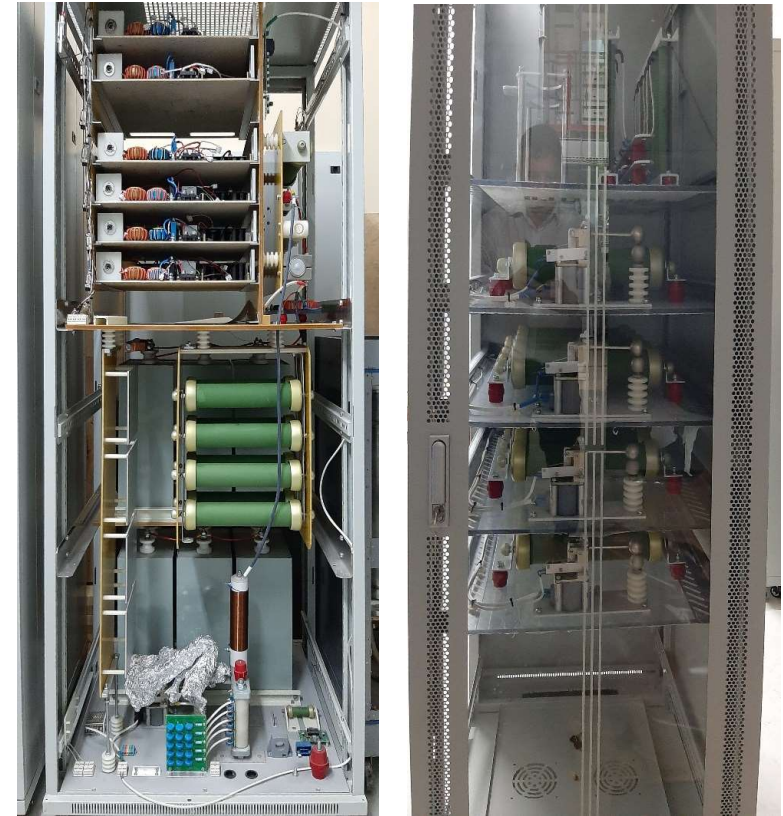


## Система атомарной инъекции КОТ

---



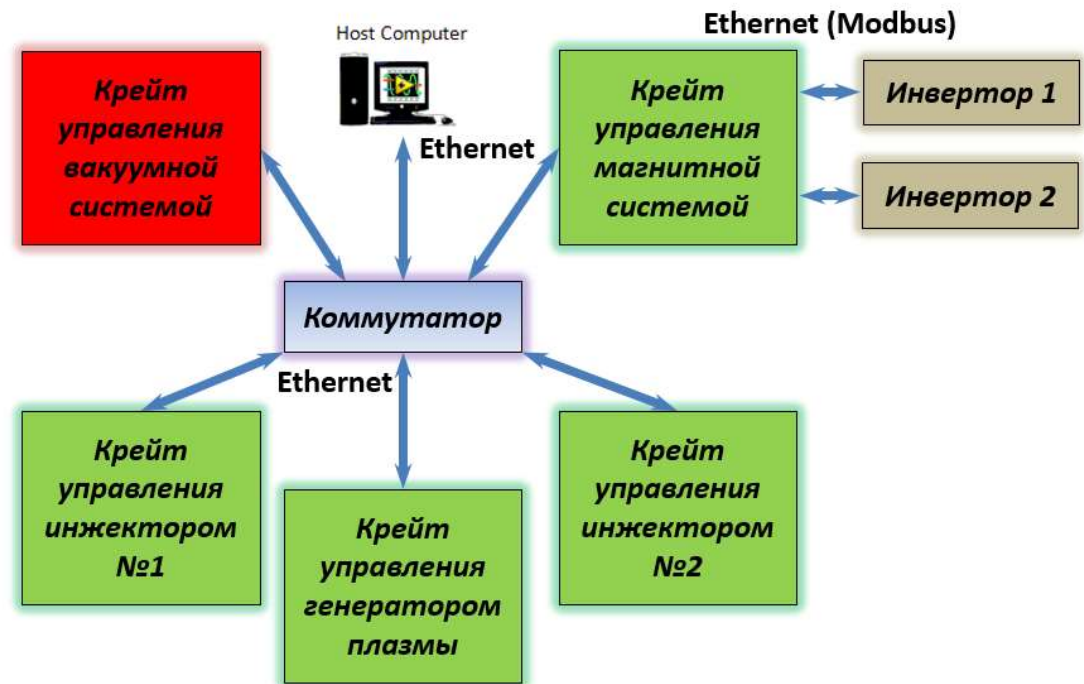
Нагревные инжекторы.



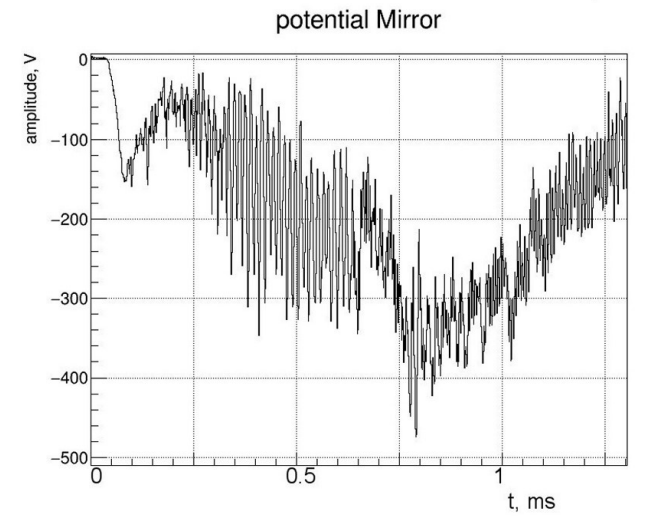
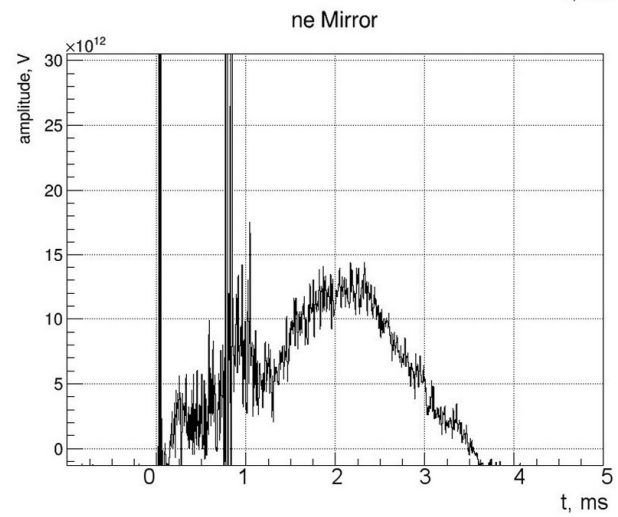
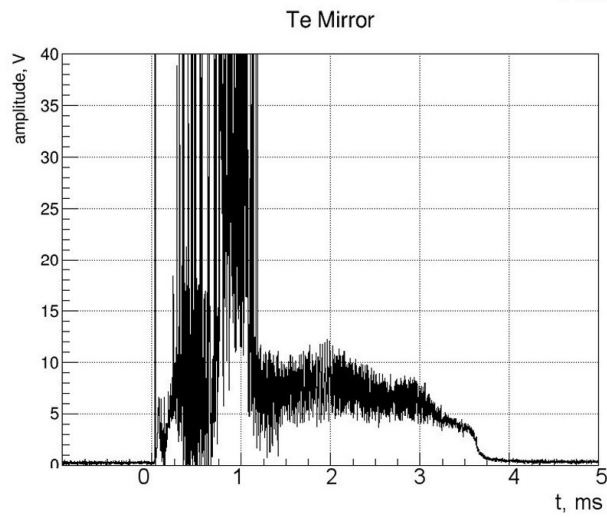
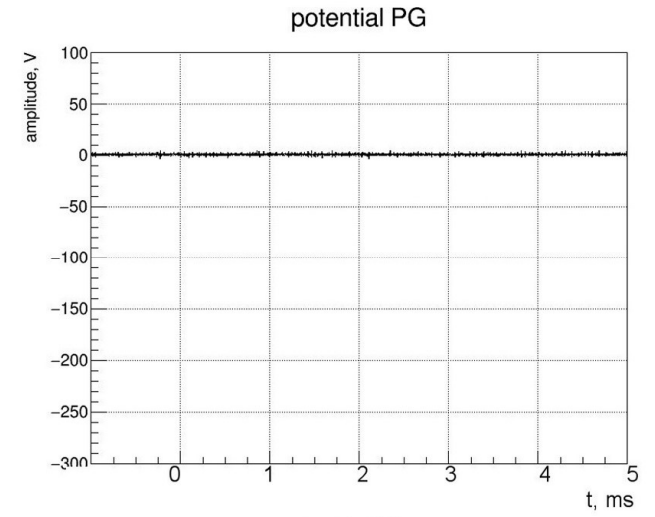
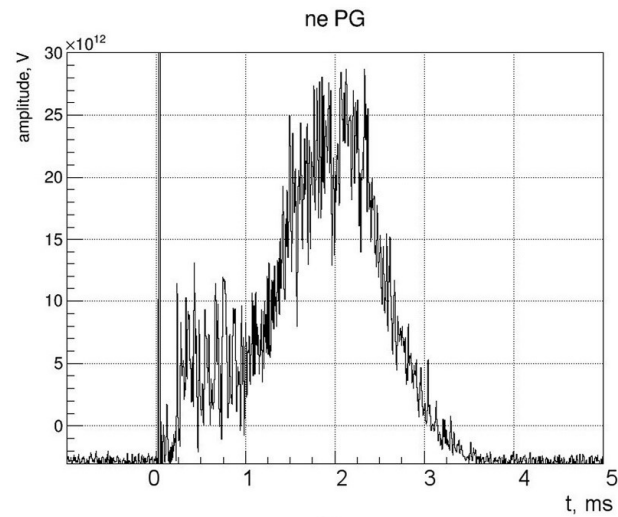
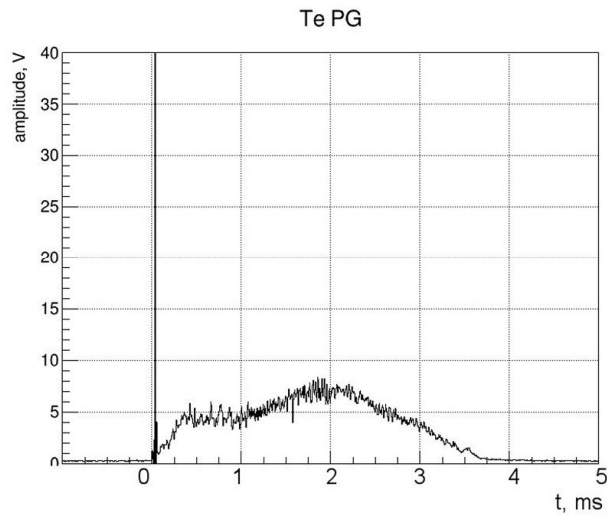
Высоковольтный модулятор NBI

## Структура системы управления установки КОТ

- Система разработана на современной элементной базе в ИЯФ СО РАН.
- Архитектура системы управления и контроля распределенная.
- В состав системы входят 5 крейтов с набором периферийных модулей.
- Основным элементом контроллера магистрали крейта является ПЛИС Intel Cyclone V, включающей в себя процессорное ядро ARM Cortex-9 (ОС Linux).  
Точность синхронизации не хуже 100 нс.
- Среда разработки - LabVIEW.



# Пользовательское окно СД



## Программа экспериментов

---

Выбор режима работы плазменной пушки.

- Устойчивая генерация мишенной плазмы с необходимыми параметрами:  $T_e \geq 50$  эВ,  $n_e \geq 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (диамагнитные, зондовые измерения, торцевой энергоанализатор).
- Эксперименты с инъекцией нейтральных пучков (анализатор атомов перезарядки, продольные потери, MSE).

**Методы создания и стабилизации плазмы с  $\beta \approx 1$**

- МГД стабилизация плазмы (вмороженность в пушку, проводящая стенка, вихревое удержание, эффекты КЛР).
- Кинетические неустойчивости.

## План экспериментов с накоплением азимутального тока

- Диагностика накопления азимутального ионного тока, развитие неустойчивостей:
  1. Анализатор атомов перезарядки:  $f_i(E)$ ,  $\tau_{fe}$ ,  $\tau_{ex}$ .
  2. Измерение углового распределения быстрых атомов перезарядки набором вторично-эмиссионных детекторов.
  3. Диаманитные петли:  $\langle n(T_{i\perp} + T_{e\perp}) \rangle$ ,  $W_F$ , контроль изменений величины и направления магнитного поля при обращении магнитного поля.
  4. Магнитные зонды, торцевой энергоанализатор: контроль развития АИЦН, ДКН.
  5. Торцевые датчики тока ионного насыщения: регистрация профиля потока вытекающих ионов на торцевой плазмоприемник (при обращении поля поток ионов на плазмоприемник пикируется вблизи оси за счет вытекания плазмы в кольцевой области за сепаратрисой).
- Изучение эффекта вытеснения магнитного поля при формировании FRC (MSE/MSE-LIF).
- Измерение радиального профиля магнитного поля в центре плазмоида по отклонению тяжёлого ионного пучка.

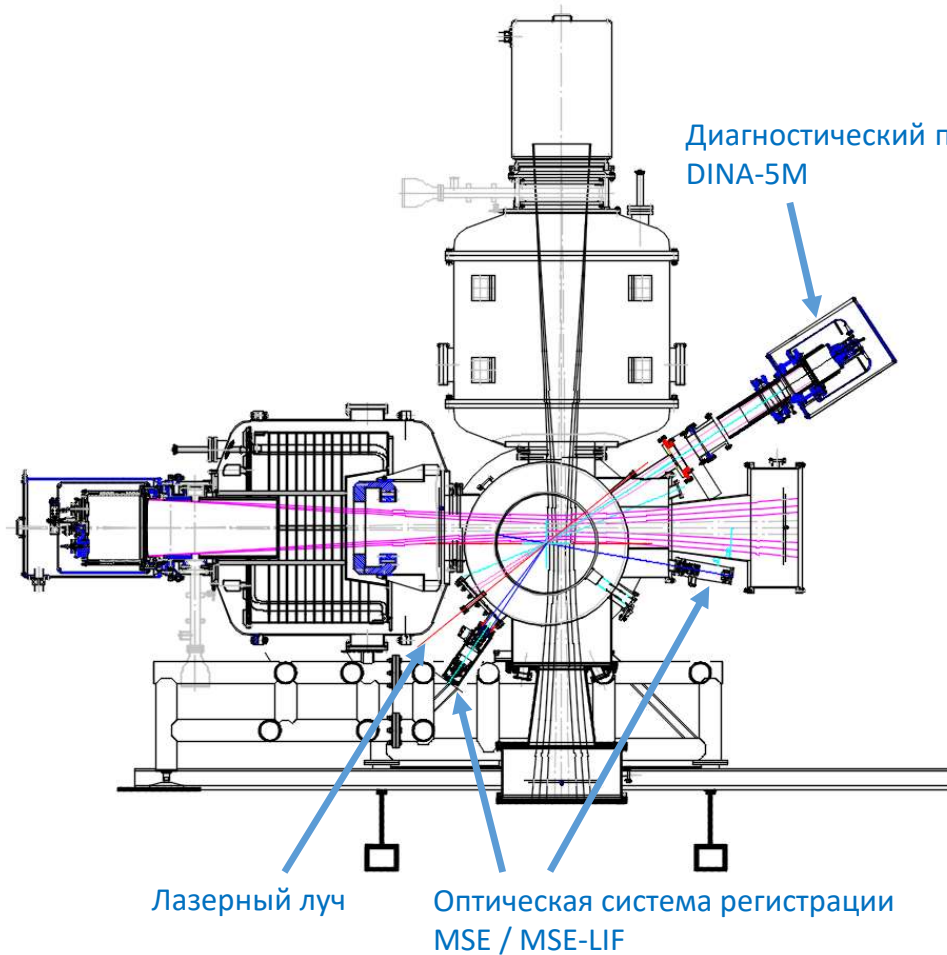


## Заключение

---

- В конце прошлого года состоялся физический пуск новой экспериментальной установки КОТ.
- В настоящее время ведутся заключительные работы по монтажу систем питания NVI. Получены первые результаты измерений параметров стартовой мишенной плазмы.
- Закончены работы по введению в эксплуатацию системы сбора данных. Ведутся отладочные работы с системой управления.
- Идет подготовка к проведению первых экспериментов по накоплению популяции горячих ионов с использованием системы мощной атомарной инжекции.

# Измерение магнитного поля в плазмоиде с $\beta \approx 1$



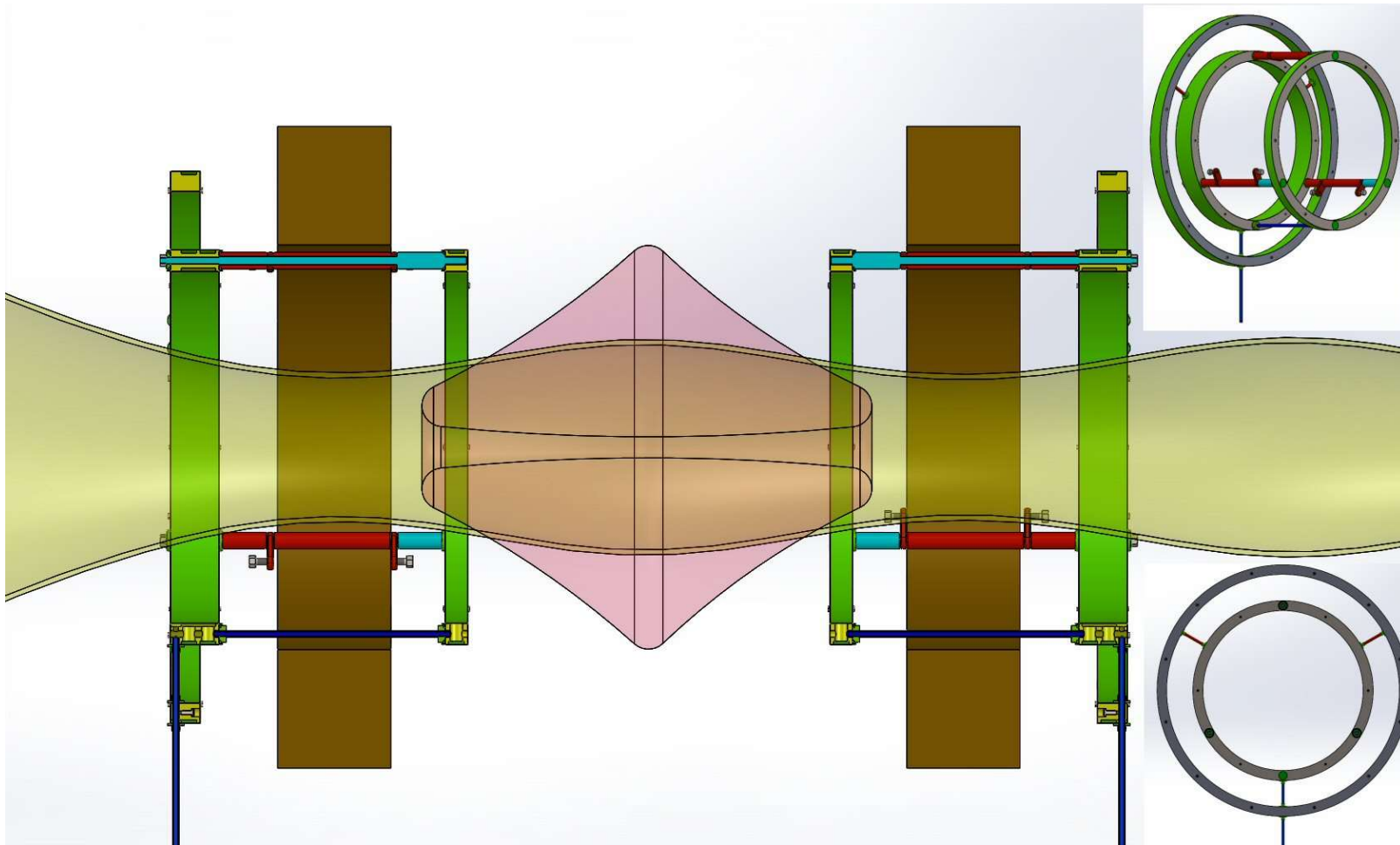
## Применение «классической» спектральной MSE-диагностики (ГДЛ):

- $B_{min} \cong 0.2 T$ ;
- Измерение только  $|B|$ ;
- Локализация  $\approx 2.5$  см;
- Одна точка по времени за выстрел;
- Экспозиция  $\geq 200 \mu s$  (зависит от плотности плазмы);
- Метод и все компоненты диагностики имеются и испытаны в измерениях.

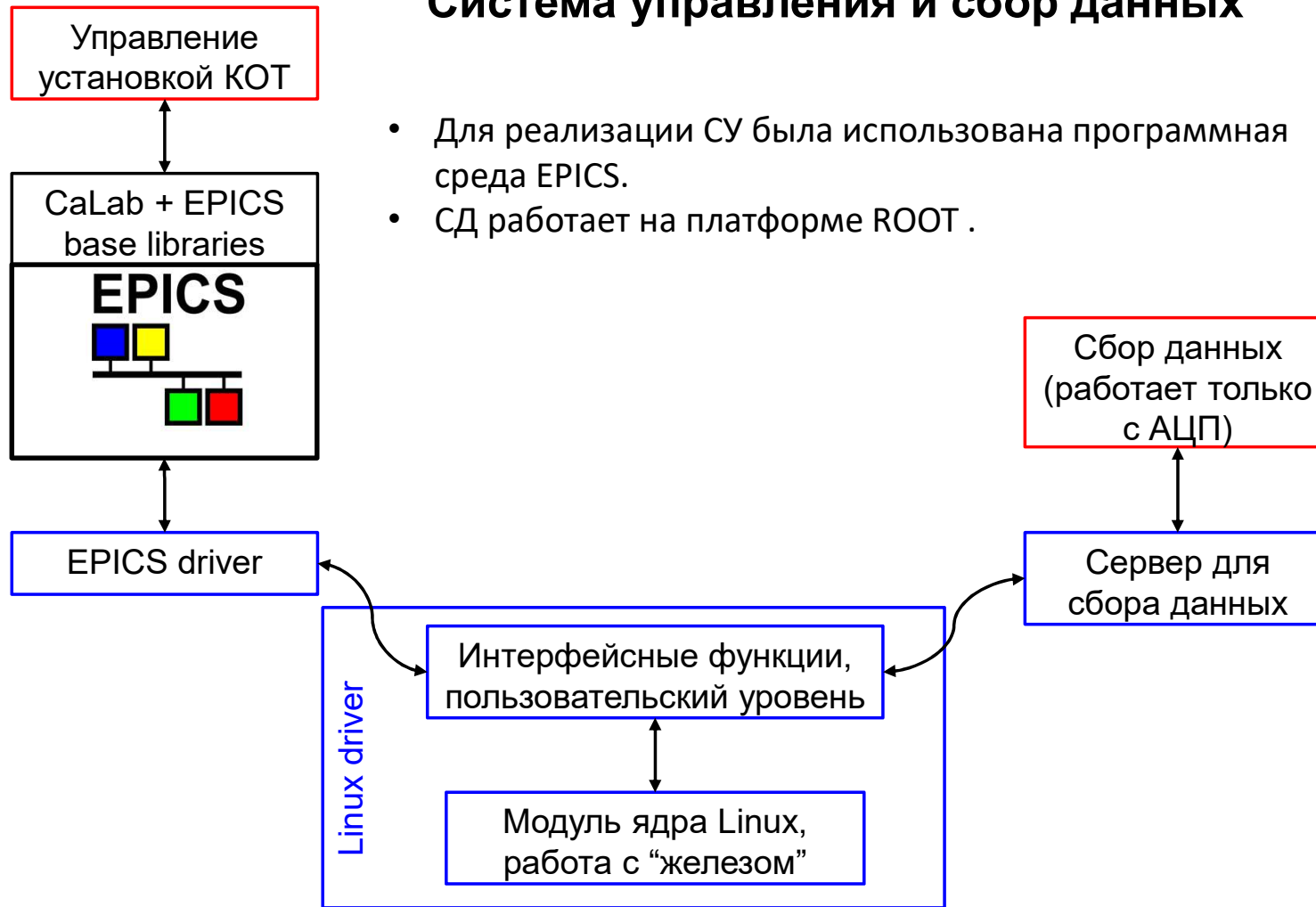
## Применение диагностики MSE с лазер-индуцированной флуоресценцией:

- $B_{min} \leq 0.1 T$ ;
- Локализация  $\approx 1$  см;
- Динамика;
- Измерение  $|B|$ : разрешение  $\tau_B \approx 250 \mu s$ ;
- Измерение направления  $B$ : разрешение  $\tau_{\rightarrow} \approx 10 \mu s$ ;
- В процессе разработки.

# Диаманитная петля



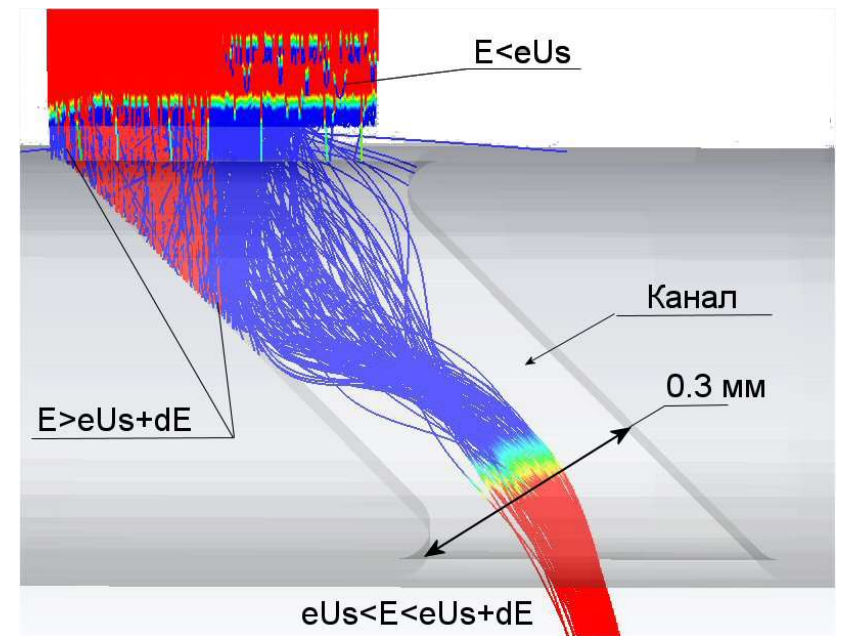
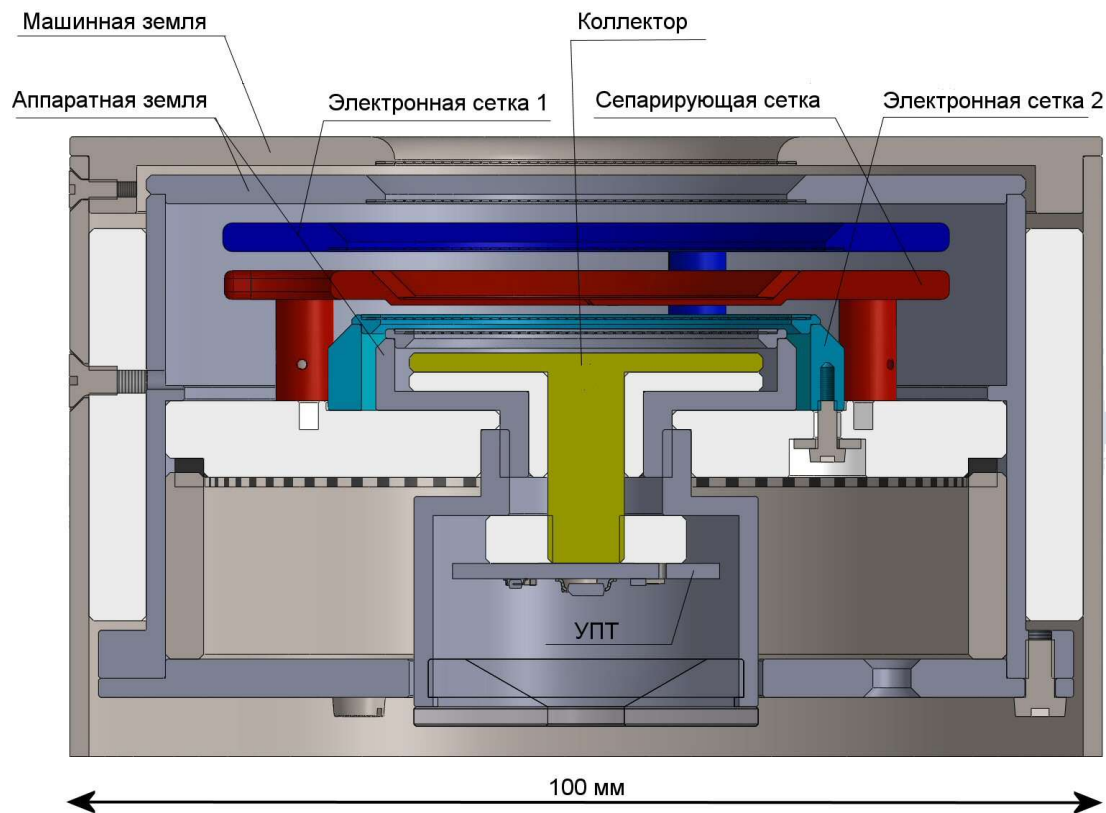
## Система управления и сбор данных



- Для реализации СУ была использована программная среда EPICS.
- СД работает на платформе ROOT .

Архитектура системы управления и контроля установки САТ распределенная. Она базируется на использовании локальных интеллектуальных контроллеров, взаимодействующих между собой и с консолью оператора по каналам связи Ethernet. Контроллеры имеют магистрально-модульную архитектуру. Один из контроллеров системы является ведущим. Он формирует общие для всей системы сигналы синхронизации и таймирования. Каждый контроллер позволяет разместить до 12 модулей управления и сбора данных.

# Канальный анализатор



# 45<sup>0</sup> электростатический анализатор

