

Научная сессия ИЯФ СО РАН
3 марта 2023



Установки ГДЛ и КОТ

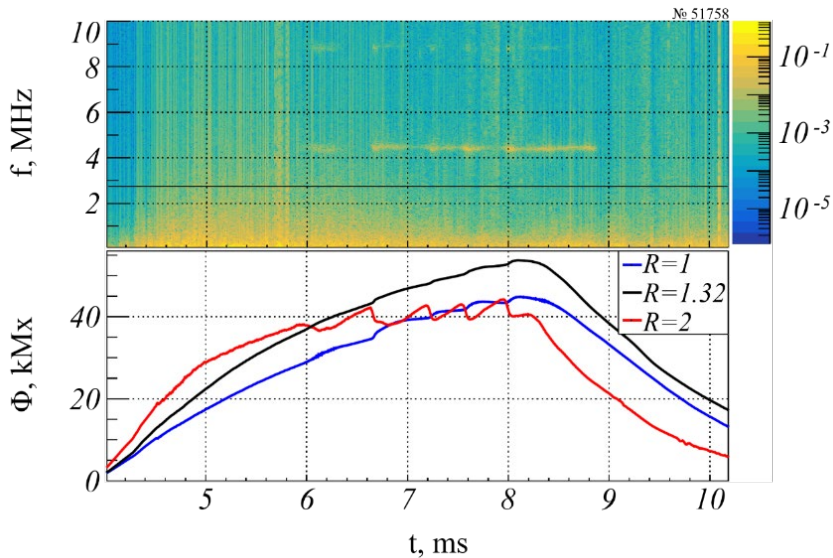
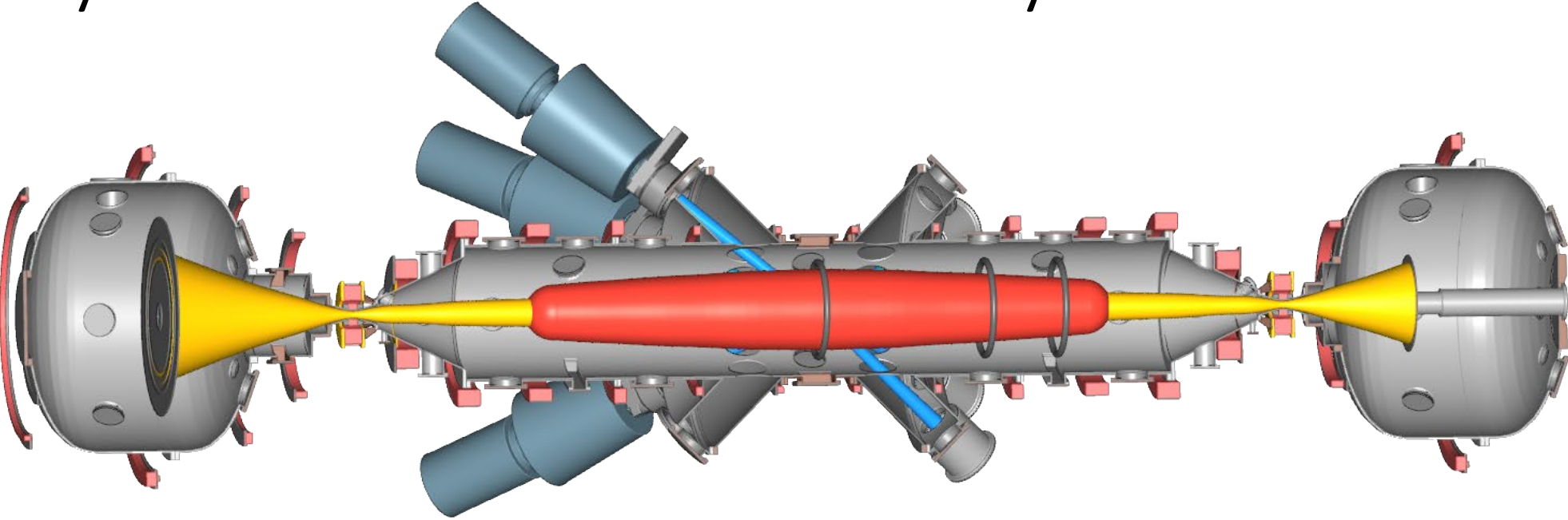


лаборатория 9-1
Солдаткина Е.И.

Лаборатория 9-1 в 2022 году

- Газодинамическая ловушка (ГДЛ)
 - Изучение кинетических неустойчивостей
 - Увеличение относительного давления плазмы
 - Развитие исследовательской инфраструктуры и диагностического комплекса установки
- Компактный осесимметричный тороид (КОТ)
 - Статус эксперимента
- Планы

Изучение кинетических неустойчивостей

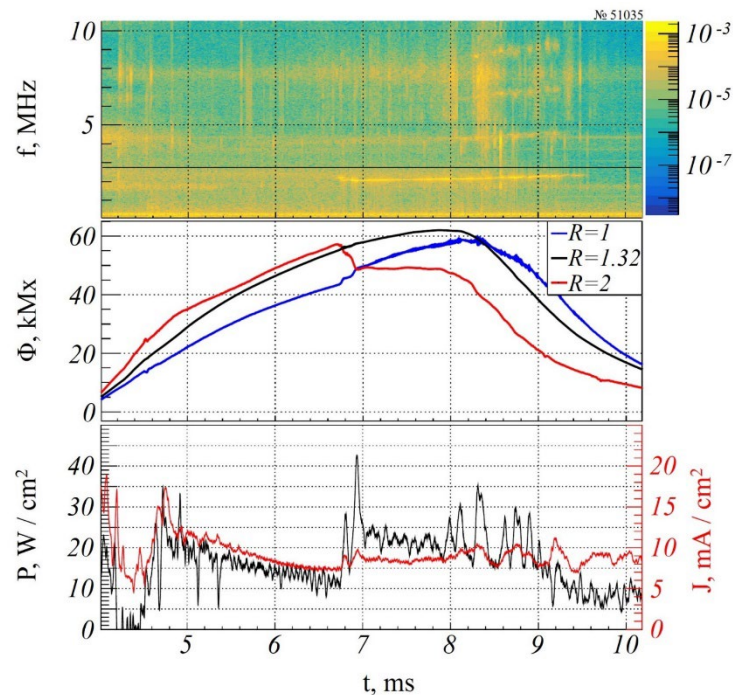
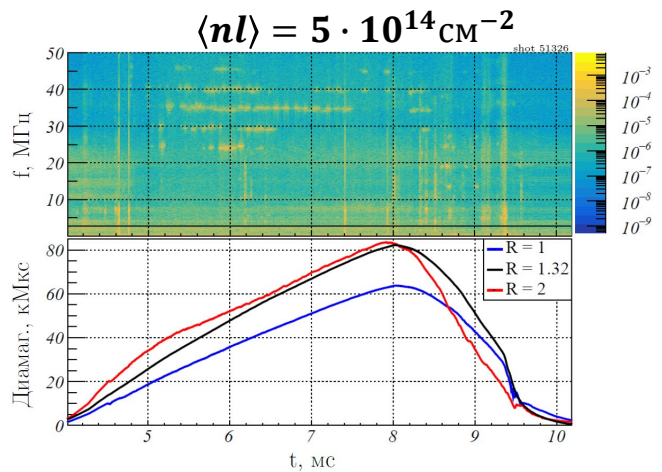
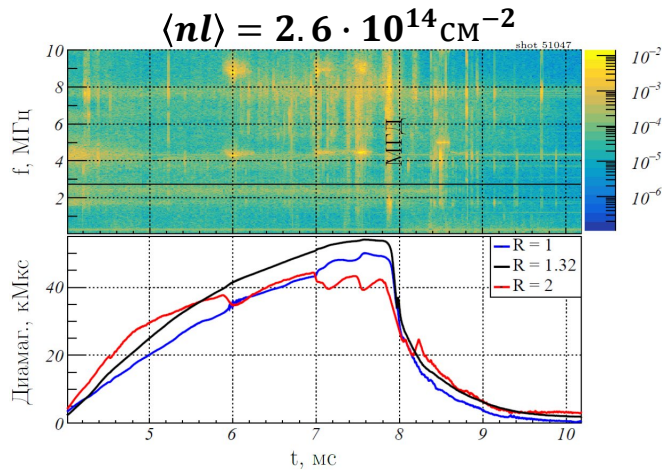


- Кинетические неустойчивости пагубно влияют на накопление и удержание популяции горячих ионов плазмы
- При разных режимах удержания плазмы в ГДЛ в ней регистрируются несколько типов кинетических неустойчивостей. Ранее на ГДЛ были изучены
 - **альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость (АИЦ)** (K.V. Zaytsev et.al. Physica Scripta V.2014, N T161, 014004)
 - **глобальная акустическая мода** (D.I. Skovorodin et.al. Fus. Sci. Tech. V.68, PP.21-27, 2015)
- В 2022 году проведена экспериментальная кампания по идентификации **дрейфово-конусной ионно-циклотронной неустойчивости (ДКН)** и изучению методов ее стабилизации

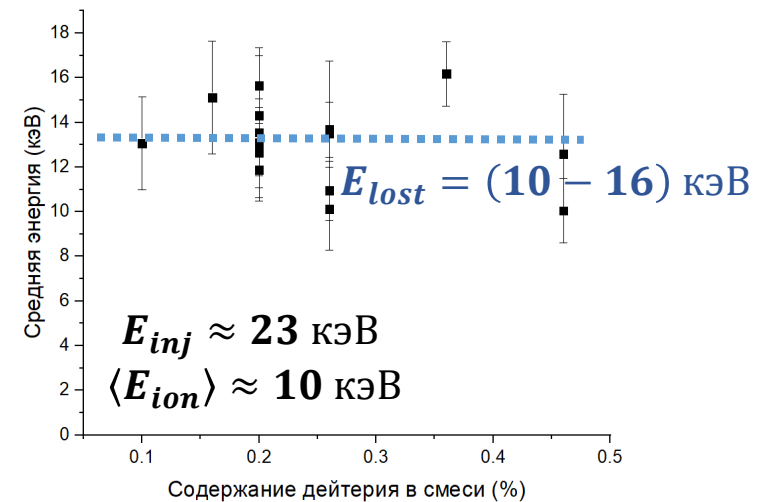
Изучение кинетических неустойчивостей

Дрейфово-конусная ионно-циклотронная неустойчивость (ДКН)

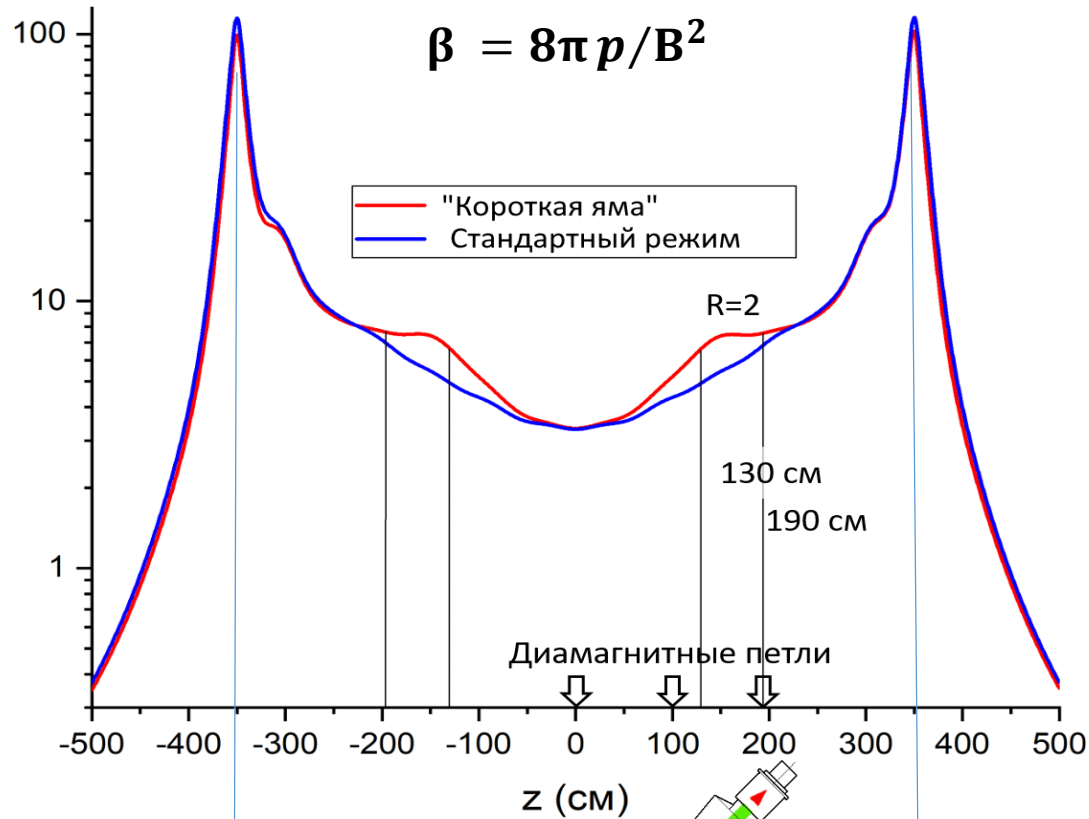
- Имеет частоты, близкие к ионной циклотронной частоте и ее гармоникам ($f_{ci}^D \approx 2,58$ МГц)
- Распространяется в сторону циклотронного вращения ионов
- Может быть подавлена при добавлении компоненты теплых ионов



В момент начала ДКН диамагнитный сигнал петли в точке остановки резко падает, а мощность потерь энергии и ток ионов на торцевом приемнике плазмы возрастают → можно оценить среднюю величину энергии вылетающих ионов



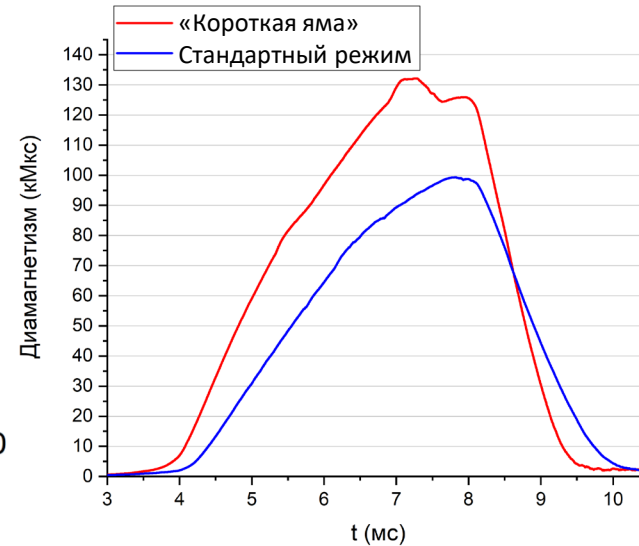
Увеличение относительного давления плазмы



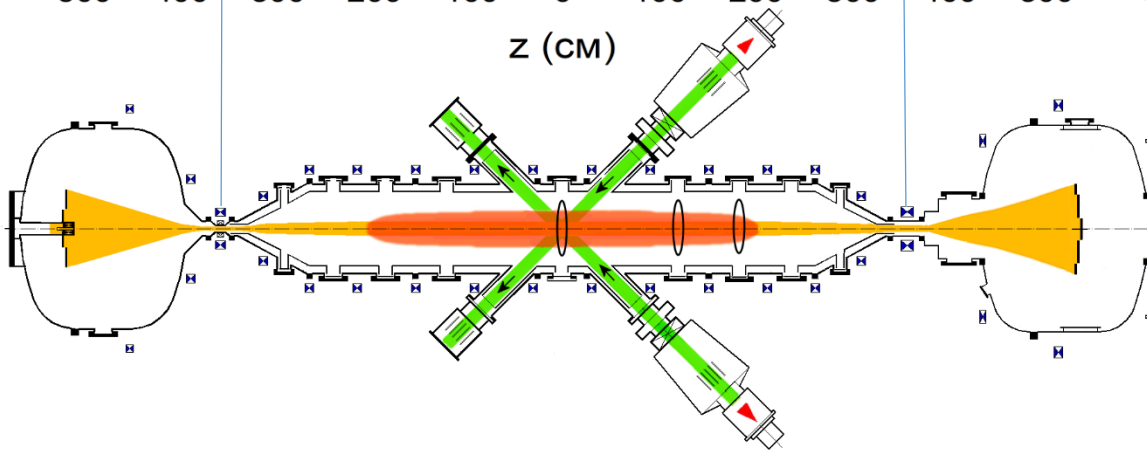
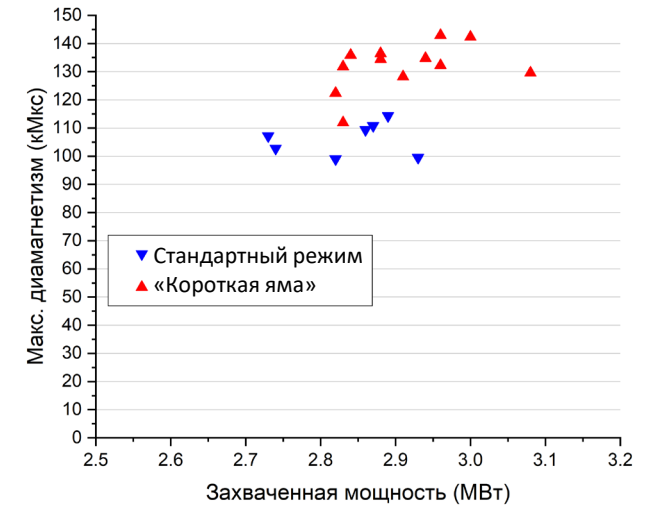
$$Q_{DT} \propto \frac{1}{\sqrt{1-\beta}}$$

— коэффициент усиления мощности термоядерного реактора

Диамагнитный поток на центральной петле R=1



Максимум диамагнитного потока на центральной петле R=1



- За счет сближения точек остановки быстрых ионов достигнуто **приращение диамагнитного потока на уровне 20-35% в центре ловушки**
- Сравнить диамагнитные потоки в точках остановки быстрых ионов проблематично в связи с развитием АИЦ-неустойчивости
- Прямое измерение относительного давления плазмы методом штарковской спектроскопии запланировано на 2023 год

Новый гиротрон



1 – гиротрон; 2 – криомагнит; 3 – компрессор;
4 – система согласующих зеркал; 5 – стол;
6 – волноводный тракт; 7 – козловой кран;
8 – ручная таль; 9 – водяное охлаждение

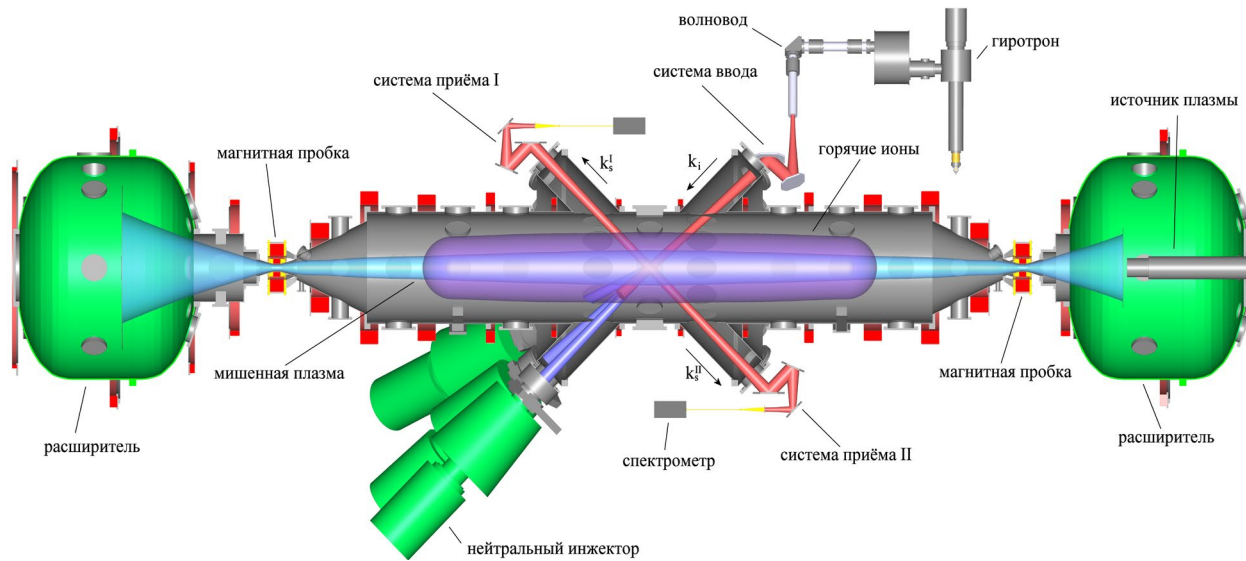
В рамках программы обновления приборной базы ИЯФ был закуплен гиротрон **GLGD 54.5/0.8/0.05**

- Импульсная СВЧ мощность – 0.82 МВт
- Рабочая частота – 54.47 ГГц
- Длительность импульса – 0.05 с

Гиротрон будет задействован в различных сценариях эксперимента на ГДЛ

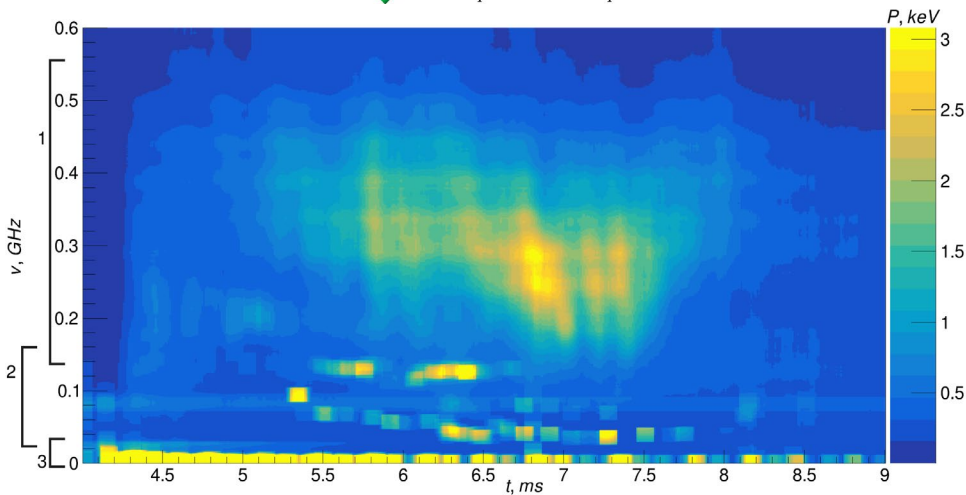
- Метод создания предварительной плазмы при помощи СВЧ-пробоя нейтрального газа
- Проверка эффективности нагрева электронов на второй гармонике ЭЦР-резонанса
- Дополнительный нагрев электронной компоненты плазмы
- Прежний гиротрон с той же частотой 54.5 ГГц и мощностью до 400 кВт будет использоваться в качестве источника зондирующего излучения для диагностики **коллективного томсоновского рассеяния**

Коллективное томсоновское рассеяние (CTS)



Диагностика коллективного томсоновского рассеяния позволит измерить двумерную функцию распределения горячих ионов в центральном сечении ГДЛ

- Разрешение по времени 10 мкс
- Разрешение по пространству 10 см
- Разрешение по энергии 500 эВ (средняя энергия популяции быстрых ионов 10 кэВ)



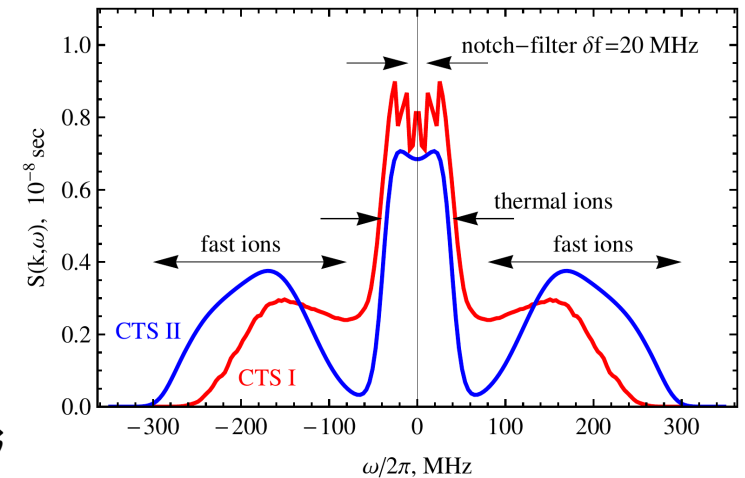
Критерий коллективности рассеяния

$$r_d \leq \lambda$$

выполняется для плазмы ГДЛ при зондировании лучом гиротрона на частоте 54.4 ГГц

Мощность рассеянного излучения

$$P_s \sim S(k, \omega) \sim \int f^i(\vec{v}) \delta(\omega - \vec{k}\vec{v}) d\vec{v}$$



Модельный спектр рассеяния

- 1 - рассеяние на быстрых ионах
- 2 - рассеяние на кинетических неустойчивостях плазмы
- 3 - рассеяние на холодной плазме и нерассеянное излучение

Томсоновское рассеяние

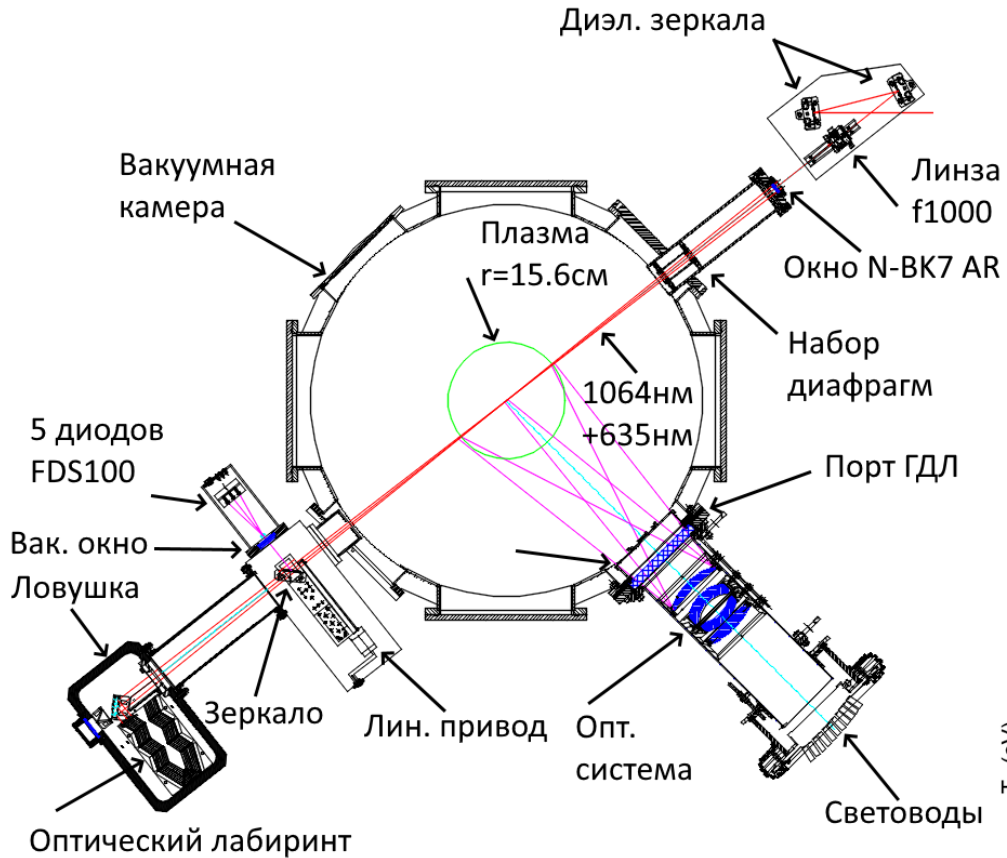
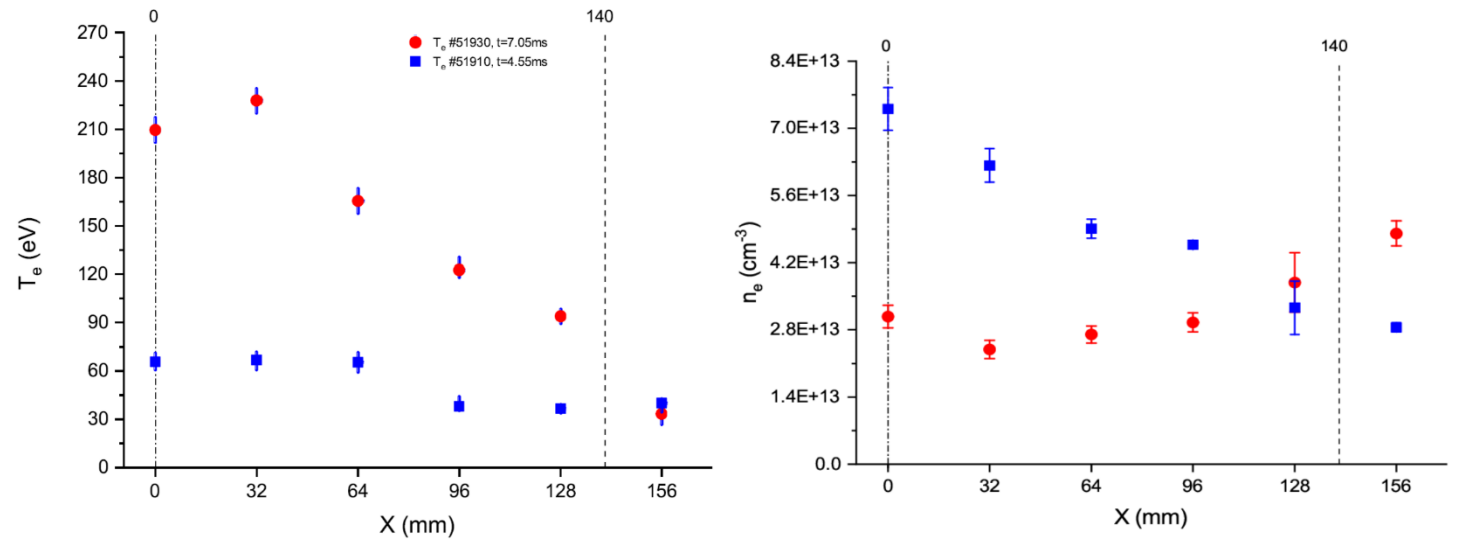


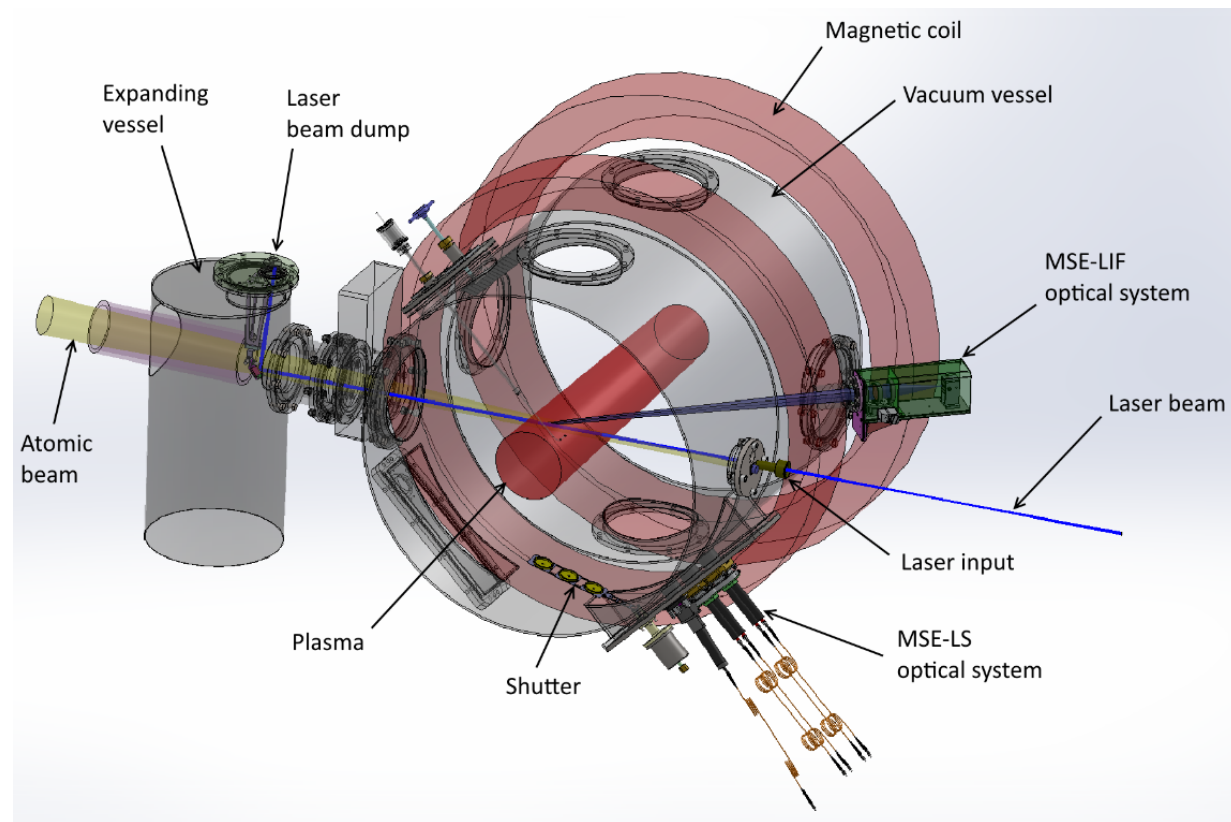
Схема диагностики на ГДЛ
(введена в эксплуатацию в 2022 г.)

- Диагностика позволяет измерять радиальные профили температуры и плотности плазмы
- Лазер Nd:YAG с длиной волны 1064 нм
- Цифровые спектрометры на полосовых интерференционных фильтрах для обработки сигналов рассеяния (*JINST 14*, C07010, 2019)
- Мониторинг и автоматическая коррекция юстировки оптической трассы лазера



Радиальные профили T_e , n_e в центральном сечении ГДЛ

Диагностика на основе динамического эффекта Штарка



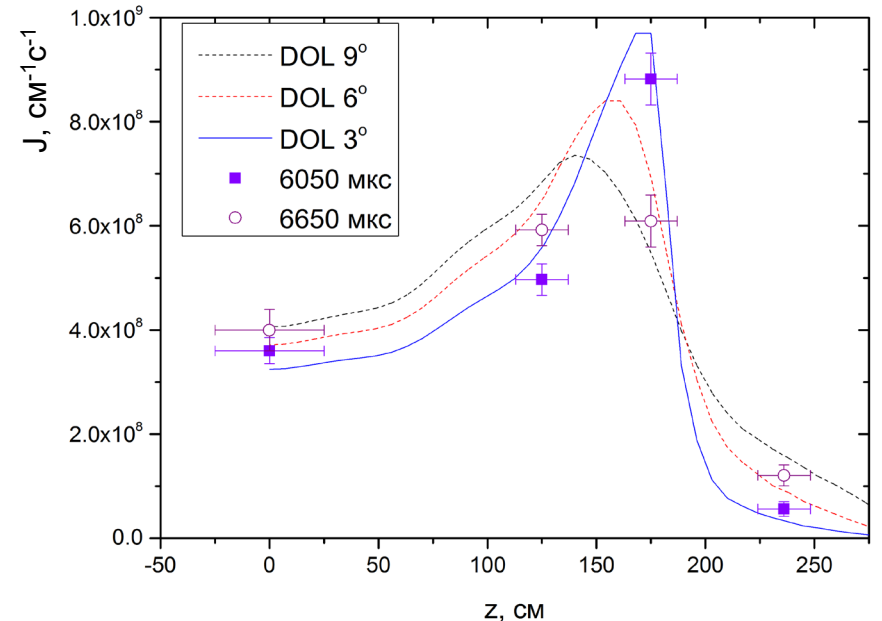
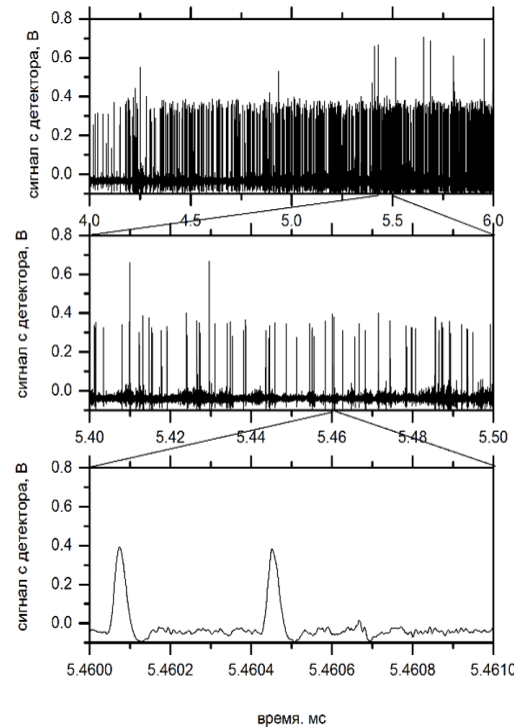
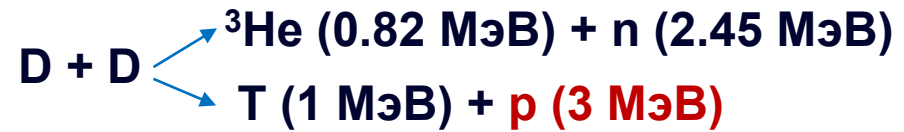
Дейтериевый пучок DINA-5M (50 кэВ), оптические системы спектральной диагностики MSE и MSE-LIF и лазерный пучок накачки

- Диагностика на основе динамического эффекта Штарка (MSE) для измерения динамики радиального профиля магнитного поля $|\vec{B}|$ и относительного давления плазмы β_{\perp} : надёжный метод в магнитных полях $B \geq 0.2$ Т, работает на ГДЛ с 2000 г.
- Диагностика MSE-LIF (лазерно-индуцированная флуоресценция) для измерения динамики радиального профиля \vec{B} в полях $B \geq 0.01$ Т: начало экспериментов на ГДЛ намечено на апрель 2023 (работа включена в прикладное гос. задание по направлению 1.1.6)

$\beta_{\perp} = 8\pi p/B^2$ – отношение поперечной составляющей давления плазмы к эффективному давлению магнитного поля

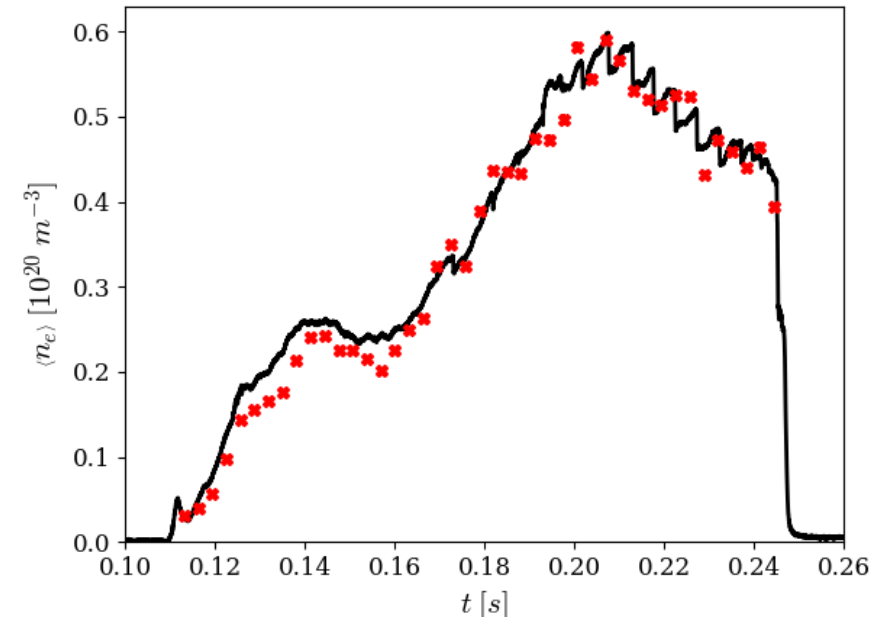
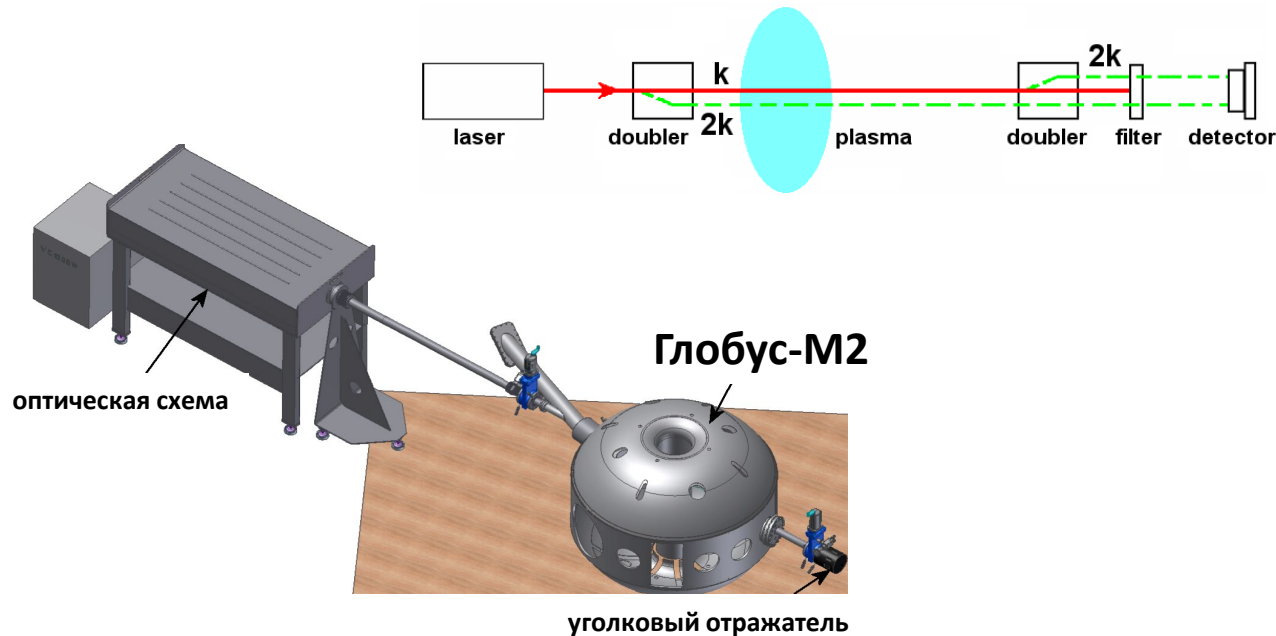
Диагностика протонов DD реакций

- В 2022 году введена в эксплуатацию линейка из 4 датчиков вдоль оси установки для измерения потока протонов из плазмы ГДЛ
- Диагностика позволяет наблюдать динамику продольной функции распределения быстрых ионов, в том числе влияние кинетических неустойчивостей
- Регистрирующий элемент – полупроводниковый диод с тонким мертвым слоем (<100 нм) и большой площадью чувствительной поверхности (0.5-4 см²)
- Специально разработанный широкополосный малозумящий усилитель, АЦП 12 бит, 2 нс
- Детектор работает в режиме счета отдельных импульсов, длительность импульса от отдельного протона 40 нс, соотношение сигнал/шум ~ 20/1



Распределение потока протонов вдоль оси ГДЛ

Дисперсионный интерферометр на токамаке Глобус-М2 (г. Санкт-Петербург)



Измерение средней электронной плотности на токамаке Глобус- М2 при помощи ДИ (черная линия) и диагностики томсоновского рассеяния (красные точки)

- В 2022 году ДИ был введен в эксплуатацию на токамаке Глобус-М2
- Характеристики данного прибора позволяют в реальном времени получать надежные данные об абсолютной величине электронной плотности плазмы во всех режимах работы установки
- Размах шумовой компоненты при измерениях линейной плотности не превышает $\langle n_l \rangle_{\min} \approx 6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при **временном разрешении в 20 мкс**
- Относительная погрешность вычисления абсолютного значения линейной плотности не превышает 2.5%

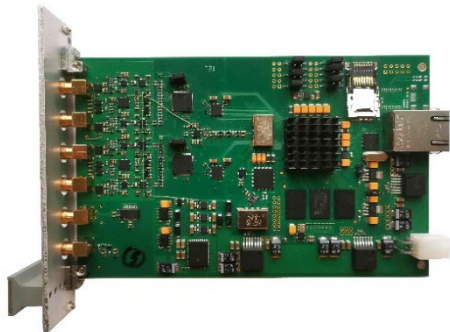
Регистраторы сигналов (группа А.Д. Хильченко)

Метод масштабно-временного преобразования

Запись сигналов в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения с дальнейшим преобразованием с помощью АЦП мегагерцового диапазона

Название	Кол-во каналов	Частота дискретизации	Разрядность
ADC105000/8	8	5 ГГц	10 бит
ADC105000/4	4	1-5 ГГц	10 бит

- ADC105000/8 - томсоновское рассеяние на установке ГДЛ, 6 пространственных точек измерения
- ADC105000/4 - диагностика потерь электронного пучка источника синхротронного излучения СКИФ

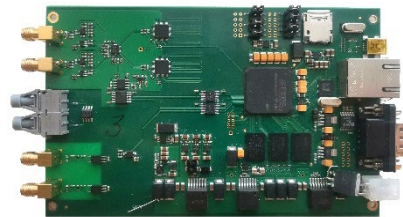


Метод прямого преобразования

Оцифровка текущих амплитудных значений сигналов быстродействующими АЦП

Название	Кол-во каналов	Частота дискретизации	Разрядность
ADC12500/2	2	4-500 МГц	10 бит
ADC14250/4	4	2-250 МГц	11 бит
ADC14100/2	2	14-100 МГц	12 бит
ADC14080/8	8	0.6-80 МГц	12 бит

- ADC12500/2 - нейтрон-гамма спектрометр с разделением событий в режиме реального времени, магнитные ВЧ зонды на ГДЛ
- ADC14100/2 - диагностика плотности плазмы на токамаке Глобус-М2 (Санкт-Петербург);
- ADC14250/4 - диагностика потерь электронного пучка СКИФ
- ADC14080/8 планируется использовать в составе измерительных комплексов на установке ГДЛ

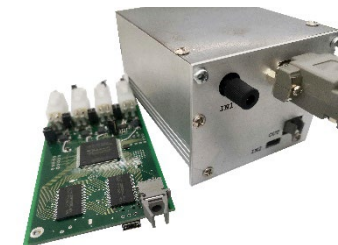


Гальванически изолированные модули

Передача данных серверу диагностики через специальный интерфейсный узел со встроенным процессором, оптоволоконные линии связи

Название	Кол-во каналов	Частота дискретизации	Разрядность
ADC13-9ΣΔ/8	8	0.625/1.25/2.5/5 МГц	13/12/9/6 бит
ADC16ΣΔ/4	4	78/156/312/625 КГц	13/12/11/9 бит
ADC1410/2 (аккум)	2	10 МГц	11 бит
ADC161/4 (аккум)	4	1 МГц	16 бит

- ADC161/4 и ADC1410/2 предназначены для проведения измерений в условиях высоких наводок на установке ГДЛ
- ADC13-9/8 – измерение продольных потоков частиц и тепла на установке ГДЛ
- ADC16ΣΔ/4 используются на установке КОТ;



КОТ – компактный осесимметричный тороид



Установка КОТ в поддержку проекта ГДМЛ:

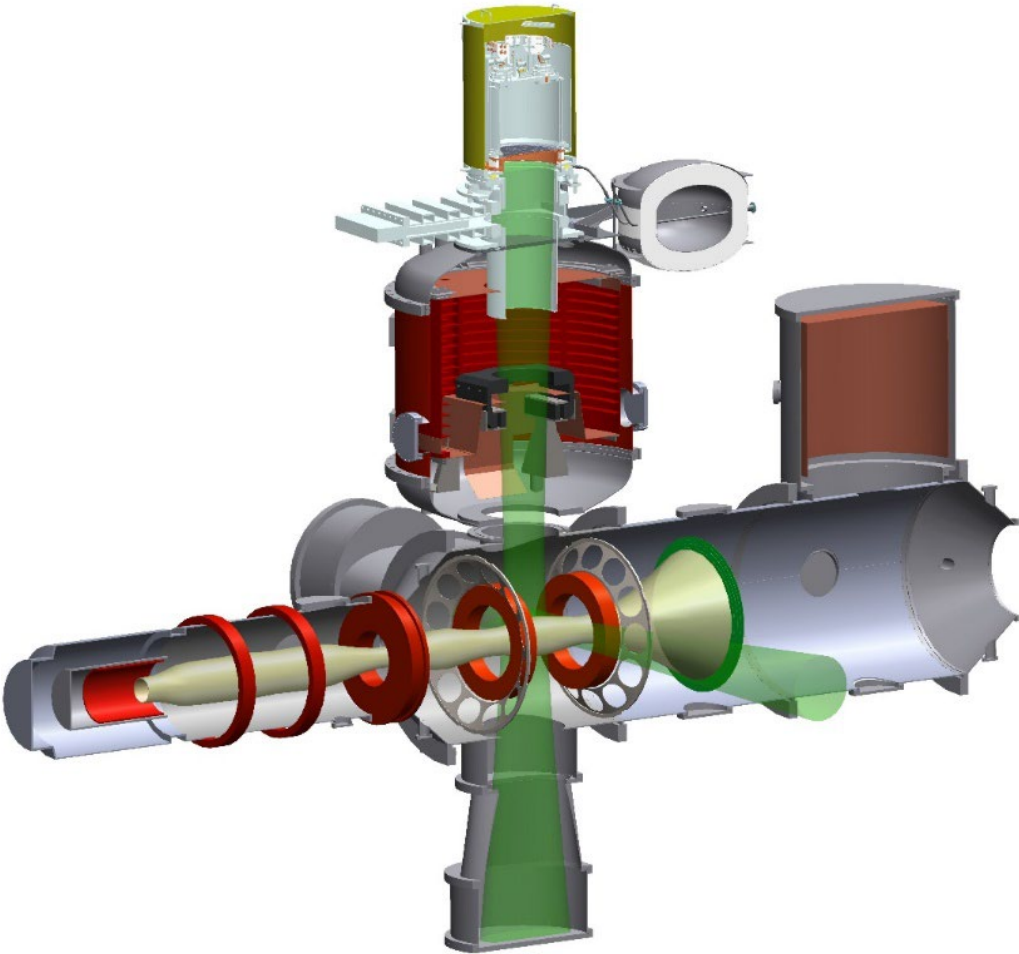
- изучение проблем удержания горячей плазмы с высоким относительным давлением β в осесимметричном пробкотроне малого объема с мощной атомарной инжекцией
- демонстрация режима диамагнитного удержания, когда $\beta \rightarrow 1$, а возможно, и режима с обращением ведущего магнитного поля

Мишенная плазма	
Радиус	10 см
Плотность	$(1-5) * 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Температура	30-50 эВ

Система атомарной инжекции	
Энергия пучков	15 кэВ
Мощность	2x2 МВт
Ток ионов	2x160 А
Длительность	8 мс
Плотность тока	3.5 А/см^2 (2ХИВ – 1.6 А/см^2)

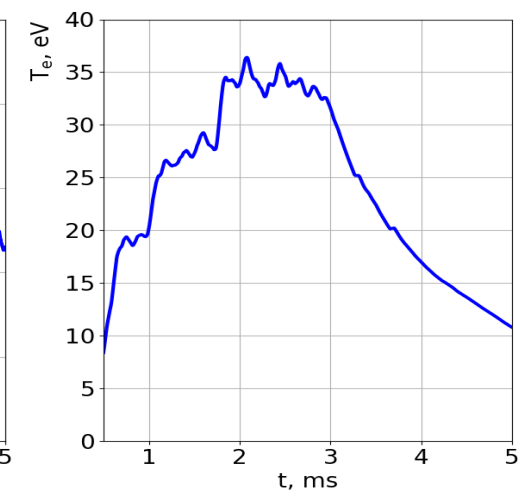
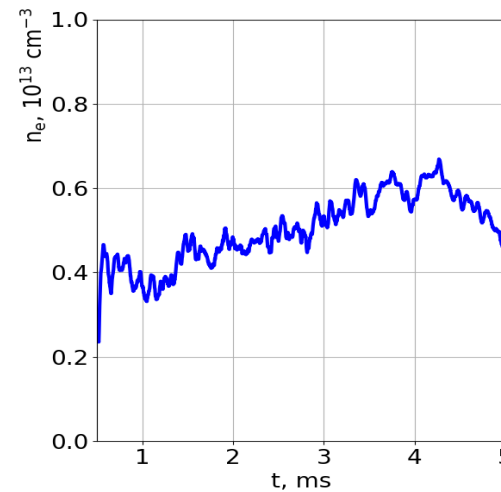
Габариты установки	
Длина	6 м
Высота	5 м
Диаметр камеры	1 м
Расстояние между пробками	0.6 м
Магнитное поле в центре	2 кГс
Пробочное отношение	2

КОТ – компактный осесимметричный тороид



В 2022 году

- Проведена оптимизация конструкции плазменной пушки, создающей мишенную плазму в установке
- Получены параметры стартовой плазмы, требуемые для последующего эффективного поглощения мощности атомарных пучков
- Завершен монтаж системы питания атомарных инжекторов, начаты отладочные работы основных систем и узлов системы атомарной инжекции
- Полностью создана и отлажена система управления основными узлами установки, а также система сбора данных



Планы 2023

- ГДЛ

- Продолжение экспериментов с высоким относительным давлением плазмы, прямое измерение β
- Эксперименты по поддержанию материального баланса плазмы с помощью плазменной струи высокого давления (пушка Маршалла)
- Нагрев плазмы на второй гармонике ЭЦР-резонанса
- Введение в эксплуатацию системы пироэлектрических болометров, расположенных вдоль оси установки ГДЛ, для измерения перезарядных потерь энергии из плазмы

- КОТ

- Запуск атомарных инжекторов, демонстрация захвата пучков и накопления горячих ионов