

Научная сессия ИЯФ – 1 февраля 2024 –

# Эксперименты на открытых ловушках ГДЛ и САТ

*Лаборатория 9-1*

А. Лизунов

# Содержание

## 1. Запуск установки SAT

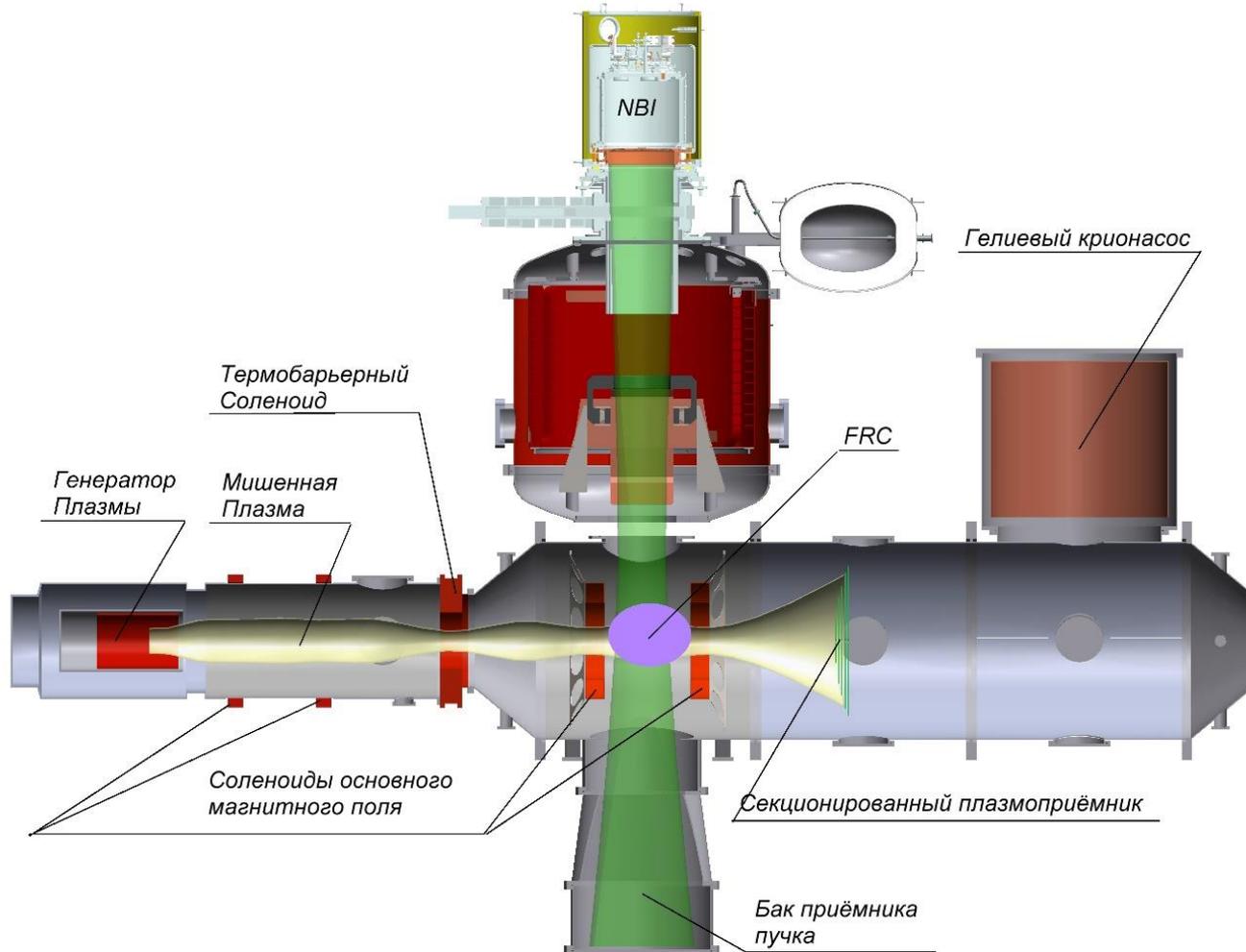
- Вакуумная система, магнитная система, система создания плазмы
- Система атомарной инжекции
- Система управления
- Диагностики

## 2. Эксперименты на ГДЛ

- Изучение анизотропной плазмы с высоким давлением ( $\beta$ )
- Баланс мощности нагрева и потерь энергии из плазмы
- ЭЦР нагрев плазмы
- Разработка новых диагностик и приборов для плазменного эксперимента и других применений

## 3. Планы

# Запуск установки CAT



Создание компактного плазменного сгустка с большой анизотропией ионной функции распределения с относительным давлением  $\beta \approx 1$  при инжекции двух пучков H или D под углом  $90^\circ$

- Ожидаемая удельная мощность в плазме:  $\geq 1$  кВт/см<sup>3</sup>
- Диамагнитное удержание плазмы, изучение неустойчивостей
- Создание конфигурации с инверсией магнитного поля внутри плазмы (FRC)

## Основные параметры установки

Длина – 6 м;

Высота – 5 м;

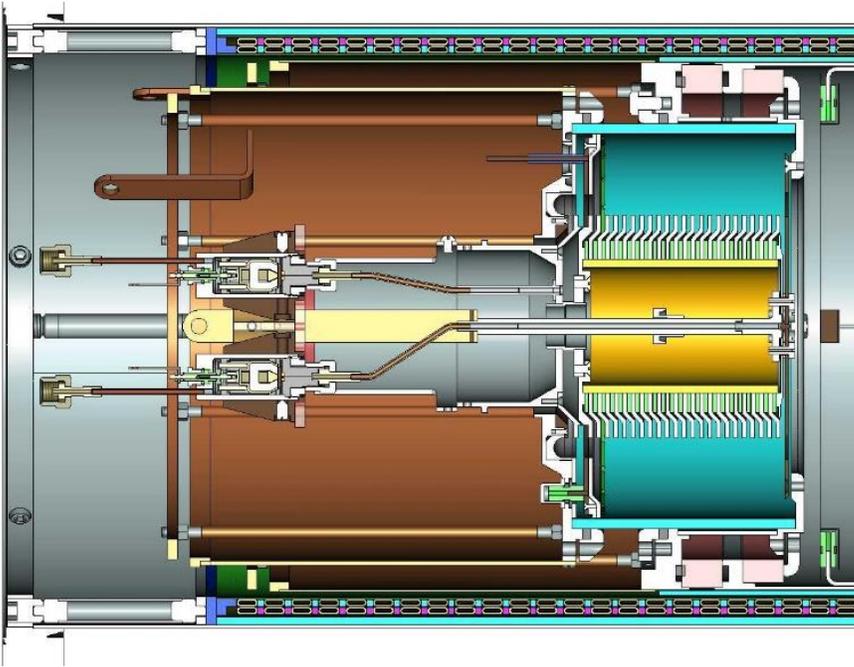
Диаметр камеры – 1 м;

Межпробочное расстояние – 0.6 м;

$B_0 = 2$  кГс;

Пробочное отношение – 2.

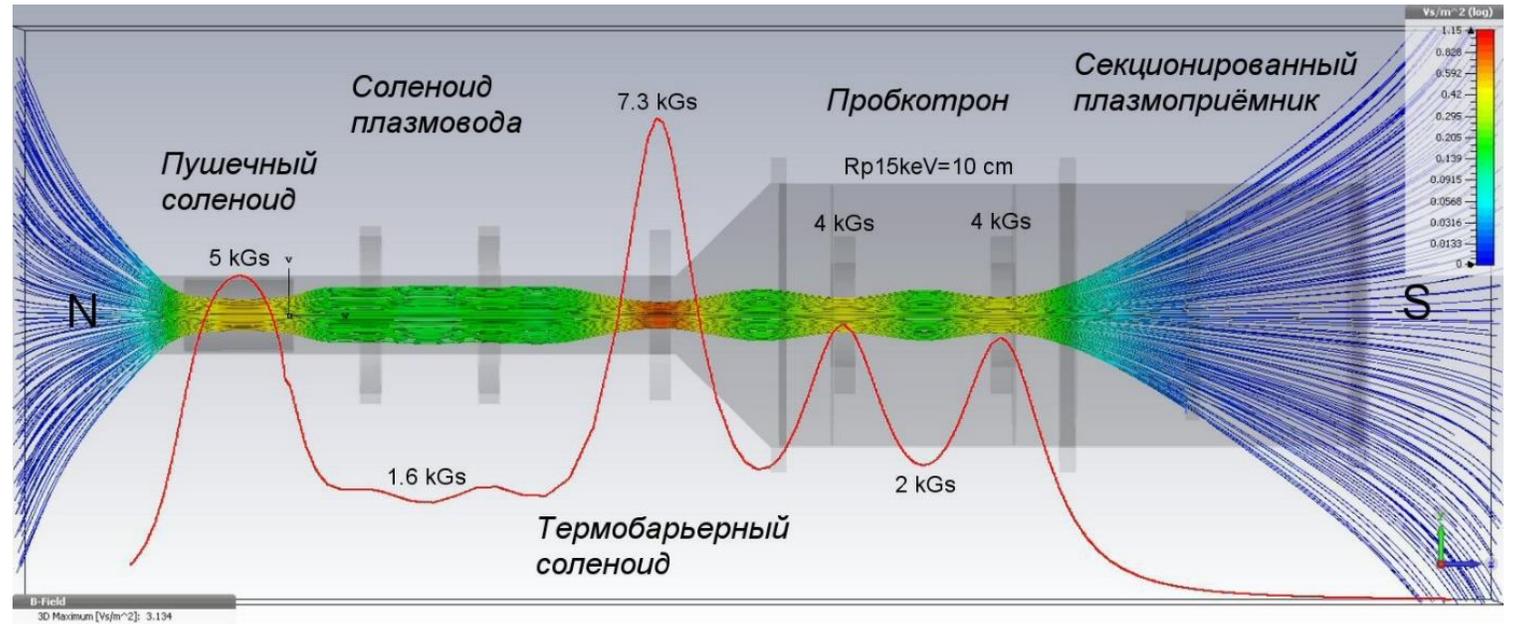
# Системы магнитного поля и создания плазмы



Дуговой генератор плазмы с разрядом кольцевого типа

Нагрев ионов в разряде при развитии неустойчивости Кельвина-Гельмгольца

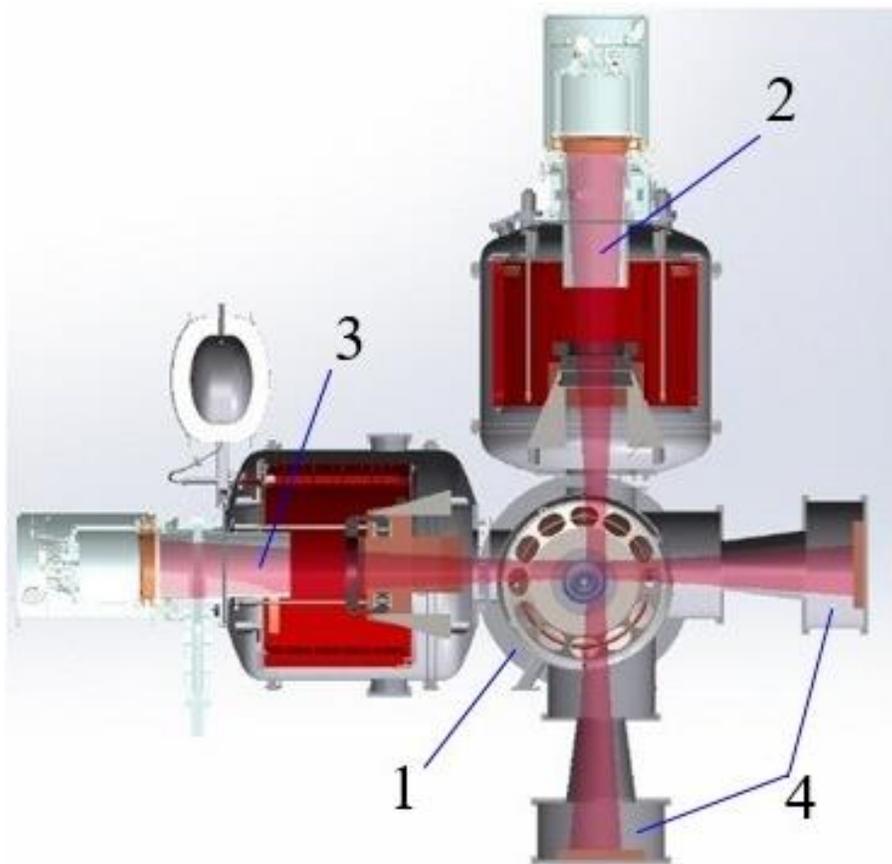
- $T_i$  до 100 эВ;
- $T_e \approx 30$  эВ;
- $n$  до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>;
- Длительность - 4 мс.



Силовые линии и продольный профиль магнитного поля

- Ларморовский радиус иона 15 кэВ Н<sup>+</sup>  $\approx 10$  см по вакуумному полю (порядка радиуса плазмы)
- Уменьшение инкремента неустойчивостей за счёт КЛР
- Возможно образование «диамагнитного пузыря» при увеличении давления плазмы в отн. слабом поле

# Система атомарной инжекции CAT



Система атомарной инжекции CAT:

1 – вакуумная камера, 2 – инжектор NB1,  
3 – инжектор NB2, 4 – приемники пучков.

## Основные параметры инжекторов:

- Рабочий газ: водород (возможен переход на дейтерий по результатам экспериментов)
- Энергия атомов – 15 кэВ.
- Ток пучка (атомы) –  $2 \times 120$  экв.А.
- Мощность пучка атомов –  $2 \times 1.7$  МВт.
- Длительность импульса – 5 мс.



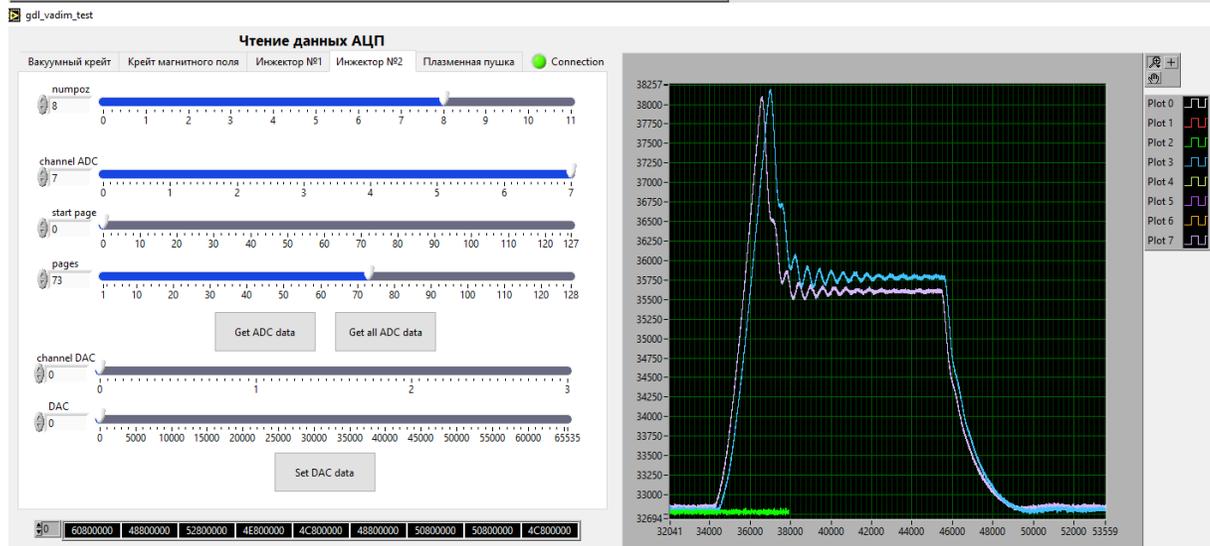
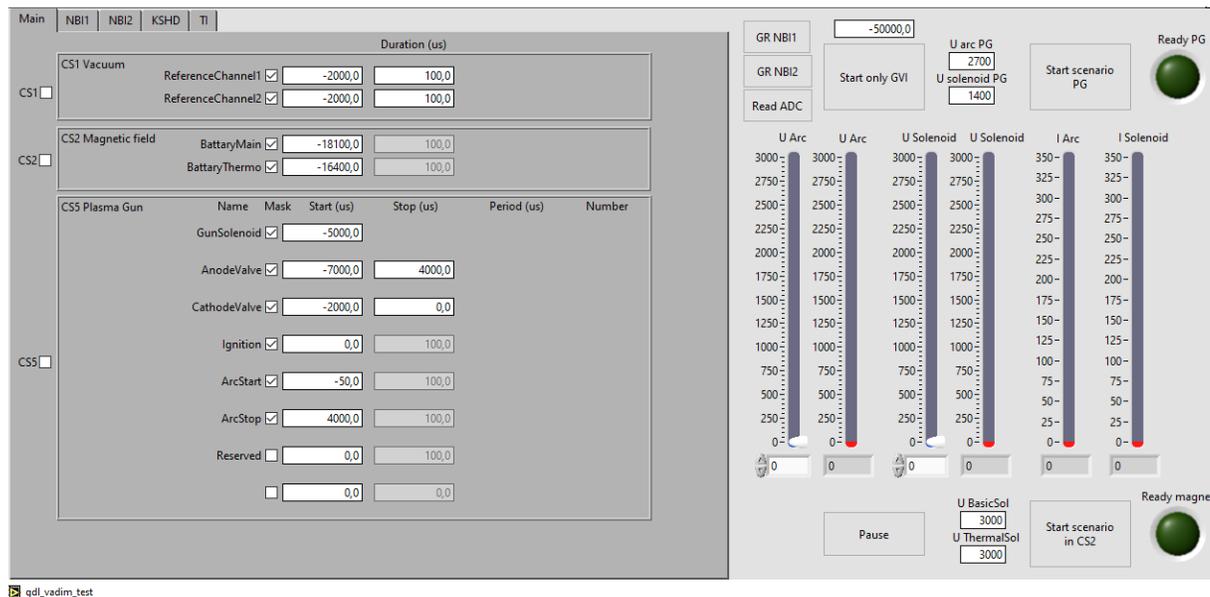
Системы питания  
атомарных пучков  
(под установкой)

- ❖ Имеется опыт 10+ лет эксплуатации таких ионных источников на других установках

## Текущее состояние

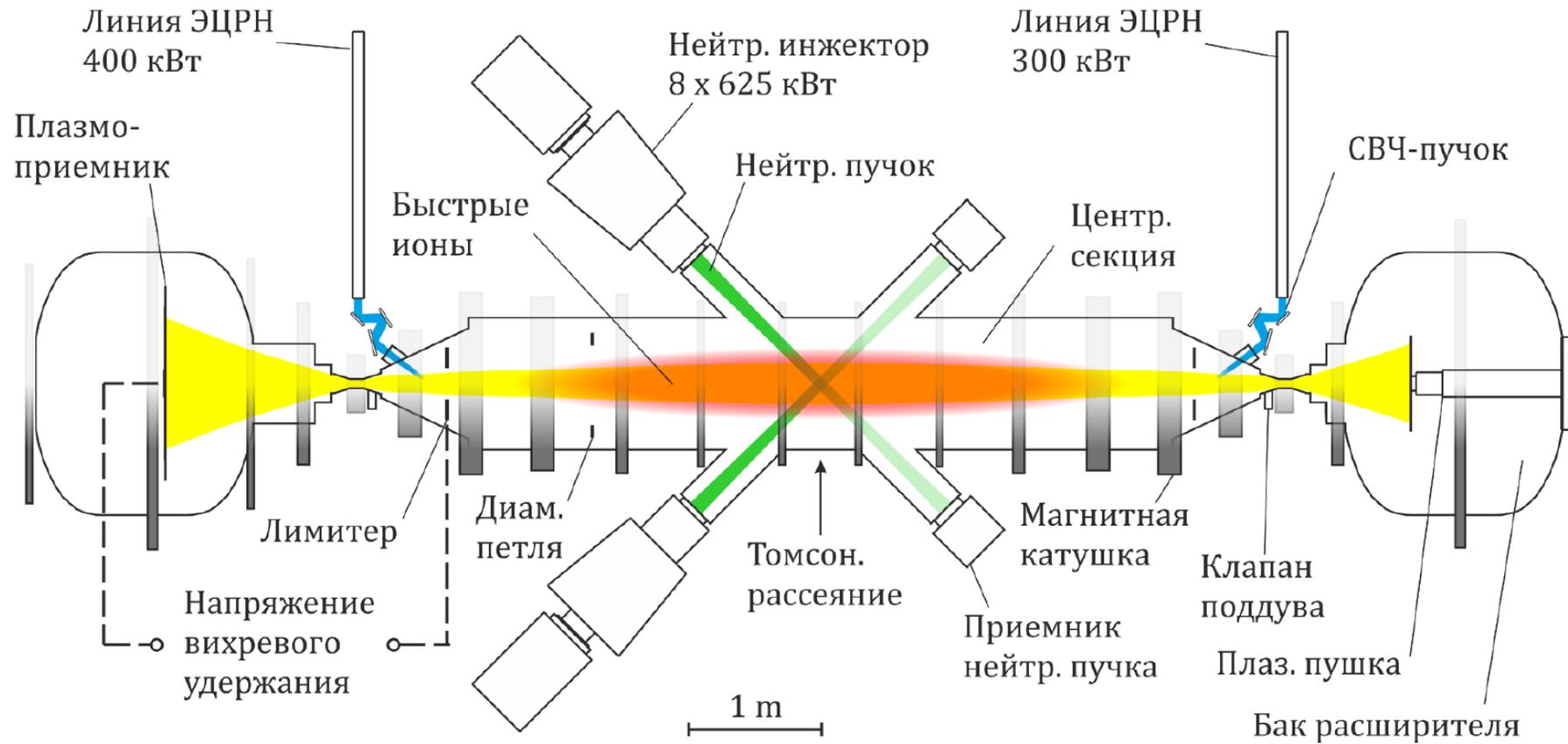
- Инжекторы 1 и 2 собраны и подключены к системе питания.
- В баках инжекторов поддерживается вакуум  $\sim 10^{-4}$  Па.
- **Сборка системы питания выполнена на 90%.**
- Система управления инжекторами функционирует.
- Проводится включение и отладка генераторов плазмы (поджиг, дуга, МИ, пр.)

# Система управления CAT



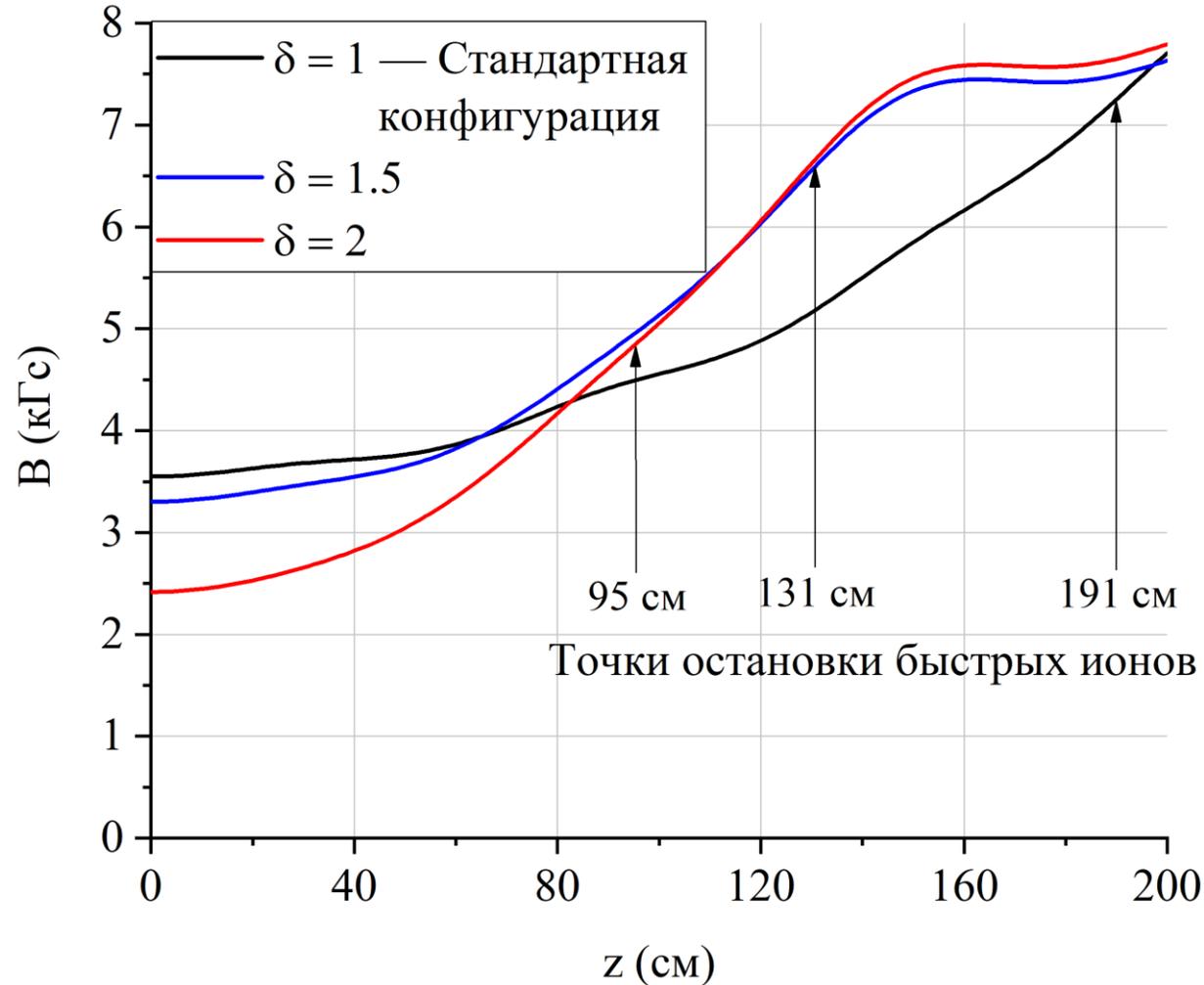
- 5 контроллеров с ARM/Linux, FPGA и набором каналов ввода/вывода (разработка лаб. 9-1)
- FPGA – критические алгоритмы обработки нештатных и аварийных ситуаций
- EPICS для обмена данными, написания «сценариев» работы устройств, архивирования и пр. (вся логика эксперимента)
- LabView для реализации графического интерфейса оператора
- ❖ СУ разрабатывается параллельно с вводом в эксплуатацию систем CAT и обеспечивает все необходимые функции

# Эксперименты на ГДЛ



# Эксперименты на ГДЛ

Изучение анизотропной плазмы с высоким давлением ( $\beta$ )



Магнитная система основного соленоида ГДЛ модифицирована для сжатия области удержания быстрых ионов в 1.5 или 2 раза (приближение точек остановки к центру)

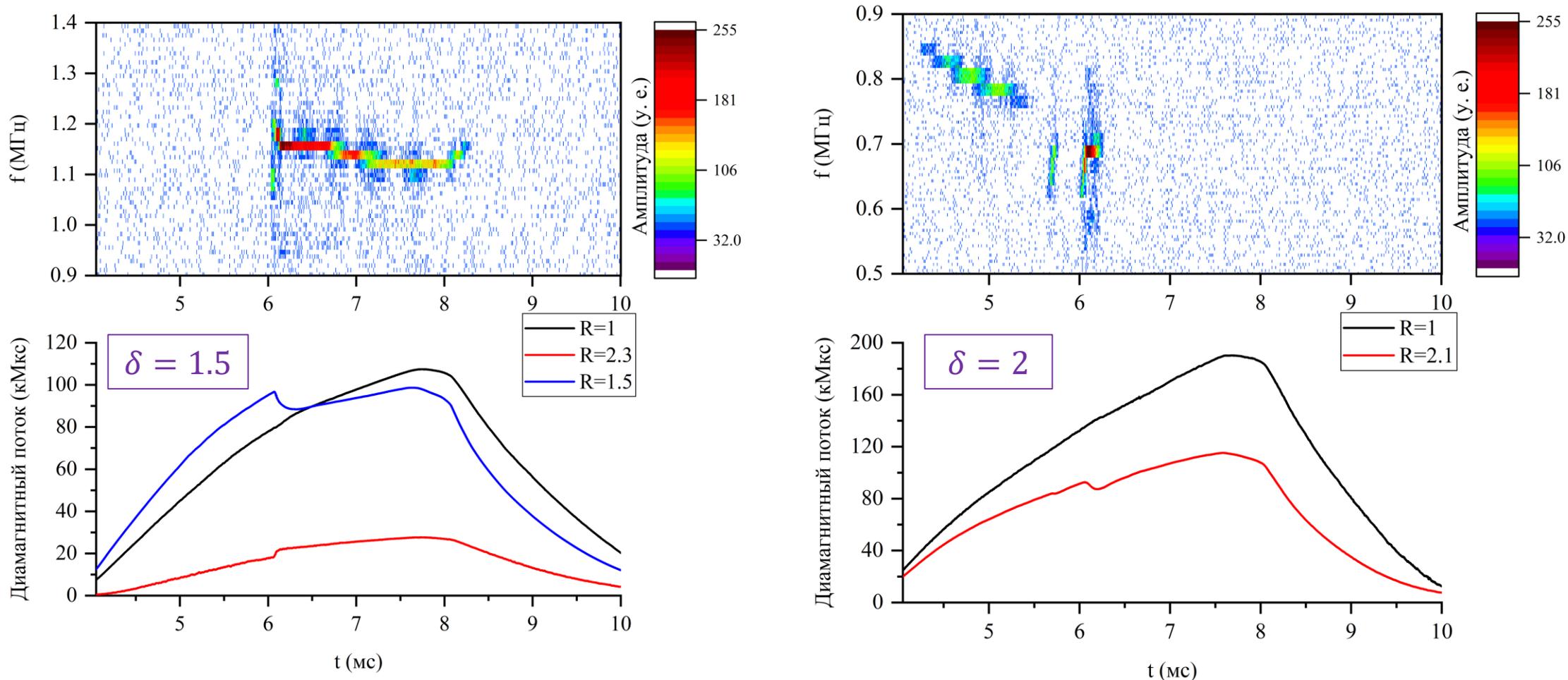
$$B_0(\delta = 1.5) = 3.4 \text{ кГс}$$

$$B_0(\delta = 2) = 2.5 \text{ кГс}$$

## Физические задачи

- Увеличение средней и максимальной локальной плотности и давления быстрых ионов
- Изучение влияния АИЦН и других кинетических неустойчивостей на параметры равновесия
- Стабилизация при помощи проводящей стенки, приближенной по радиусу к границе плазмы

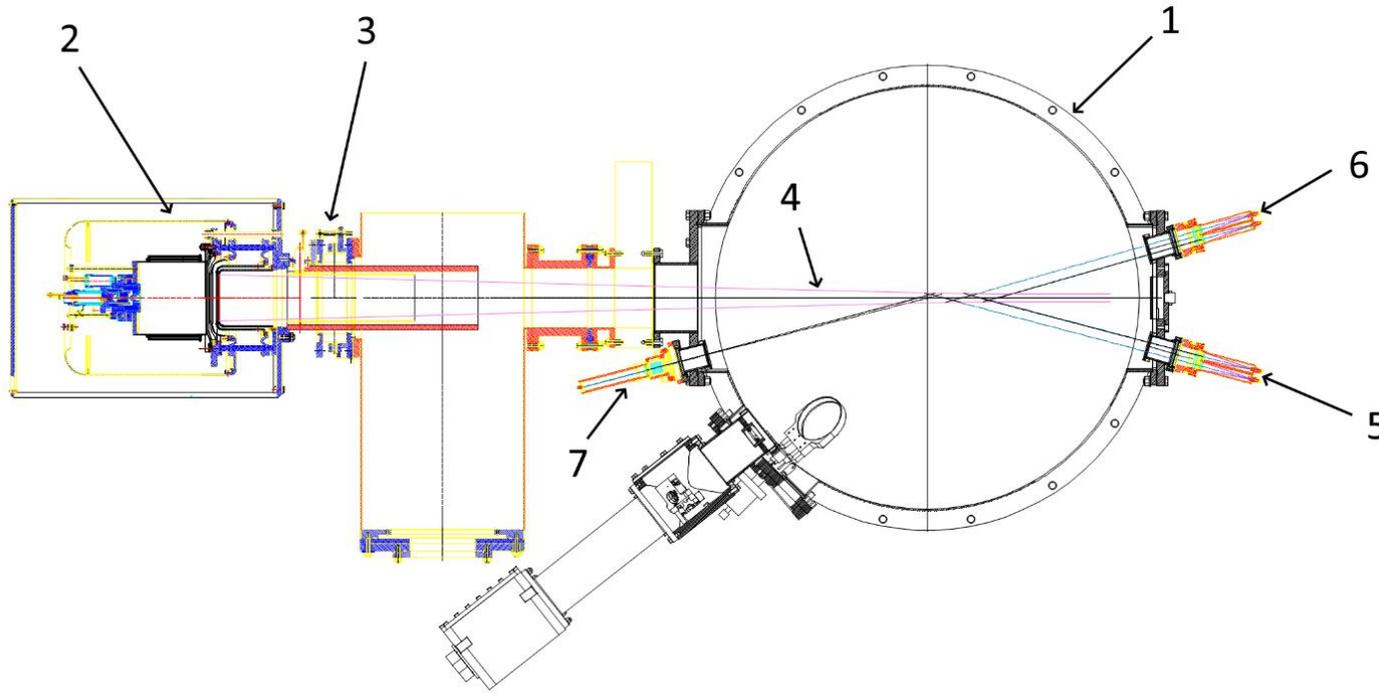
# Динамика равновесия анизотропной плазмы при развитии АИЦН



Сигналы диамагнитных петель и спектрограммы магнитных зондов (радиальное магнитное поле)

Развитие АИЦН сопровождается (является причиной?) перестройкой продольного и радиального распределений давления быстрых ионов

# Измерение радиальных профилей относительного давления плазмы в центре ГДЛ



## Спектральная MSE диагностика (5 линий наблюдения):

вакуумная камера установки ГДЛ, 2 – ионный источник DINA-5M, 3 – нейтрализатор, 4 – диагностический пучок, 5 – оптическая система, линии наблюдения 1 и 2, 6 - оптическая система, линии наблюдения 3 и 4, 7 – оптическая система, линия наблюдения 5

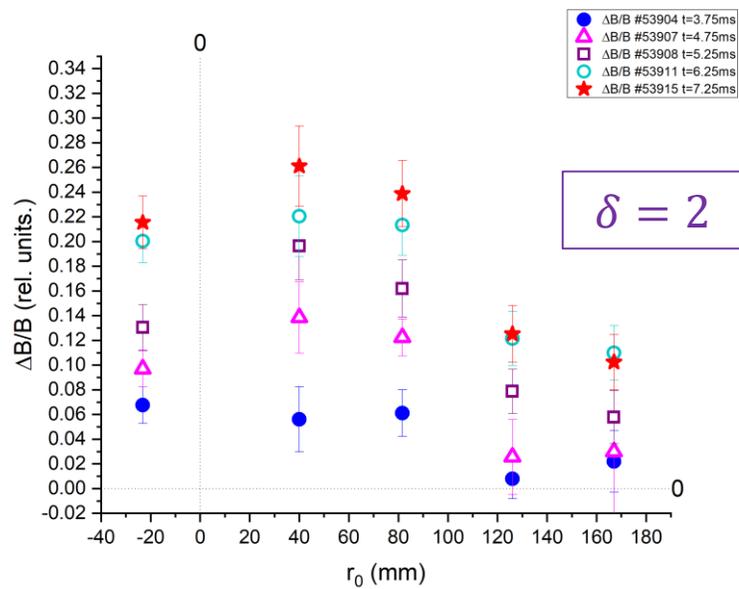
$$\text{«Относительный диамагнетизм»} = \frac{\Delta B}{B_0}$$

Для измерения локального магнитного поля  $B_z$  применяется диагностика на основе динамического эффекта Штарка

Основные параметры:

- Диагностический пучок D 48 кэВ, 2.5 экв.А
- 5 линий наблюдения
- Радиальное разрешение  $\approx 4$  см
- Разрешение по времени 500 мкс
- Частота повторения (ЛН-5) 1 кГц
- Минимальное магнитное поле  $\approx 1.8$  кГс

# Динамика радиальных профилей относительного давления плазмы в центре ГДЛ



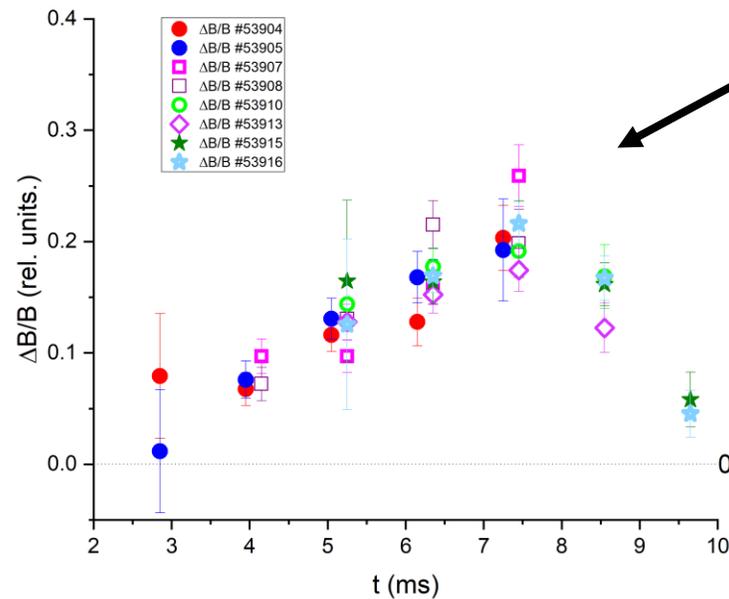
Радиальные профили отн. диамагнетизма  $t = 3.75 - 7.25$  мс

Максимум наблюдается на радиусе, близком к прицельному параметру пучков

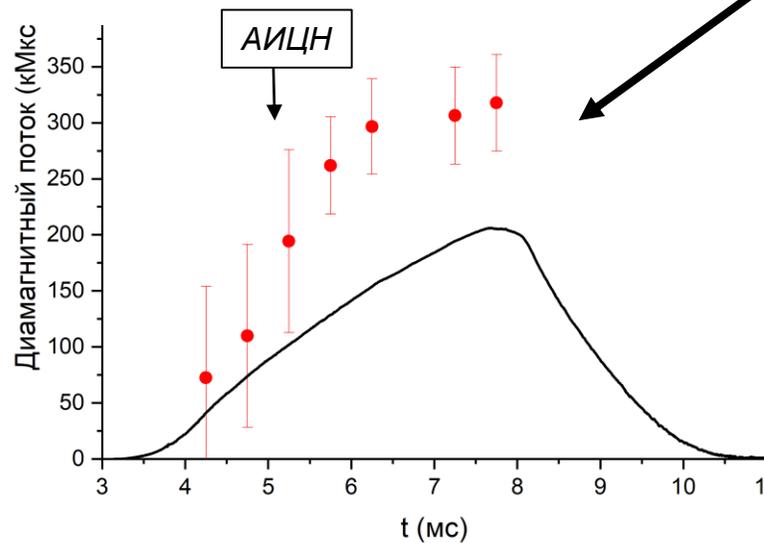
Макс.  $\frac{\Delta B}{B_0} = 0.27$

Оценка равновесия плазмы с резкой границей →

относительное давление (beta)  $\geq 0.5$



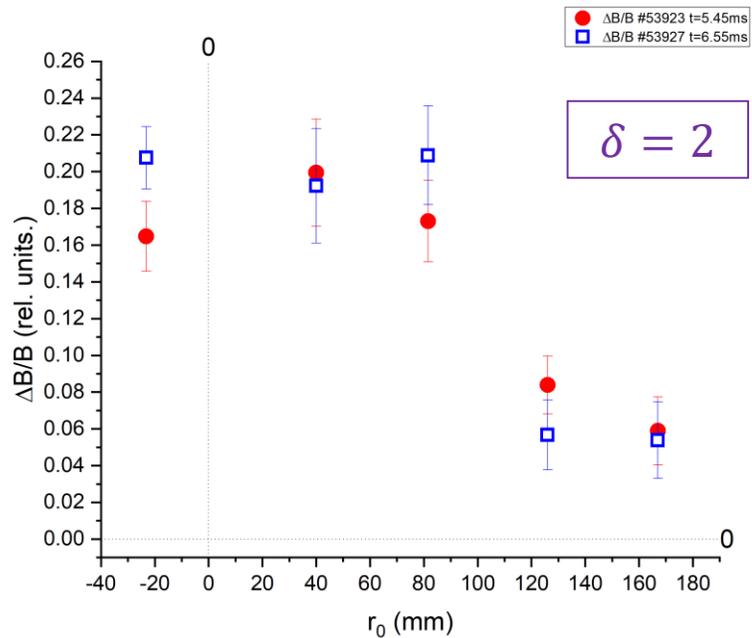
Динамика  $\frac{\Delta B}{B_0}$  по ЛН-5 в различных выстрелах



2. ГДЛ

- Полный диамагнитный поток, вычисленный интегрированием радиальных профилей в режиме  $\delta = 2$ , значительно (до 1.8 раз) превосходит показания петли, расположенной близко к центру.
- Динамика также заметно отличается, что наиболее выражено при АИЦН
- Крыло профиля  $r > 16.5$  см (где нет измерений MSE), даёт значительный вклад в интеграл потока.
- Магнитный поток обратного знака, вытесненный из плазмы, частично регистрируется диамагнитным зондом.

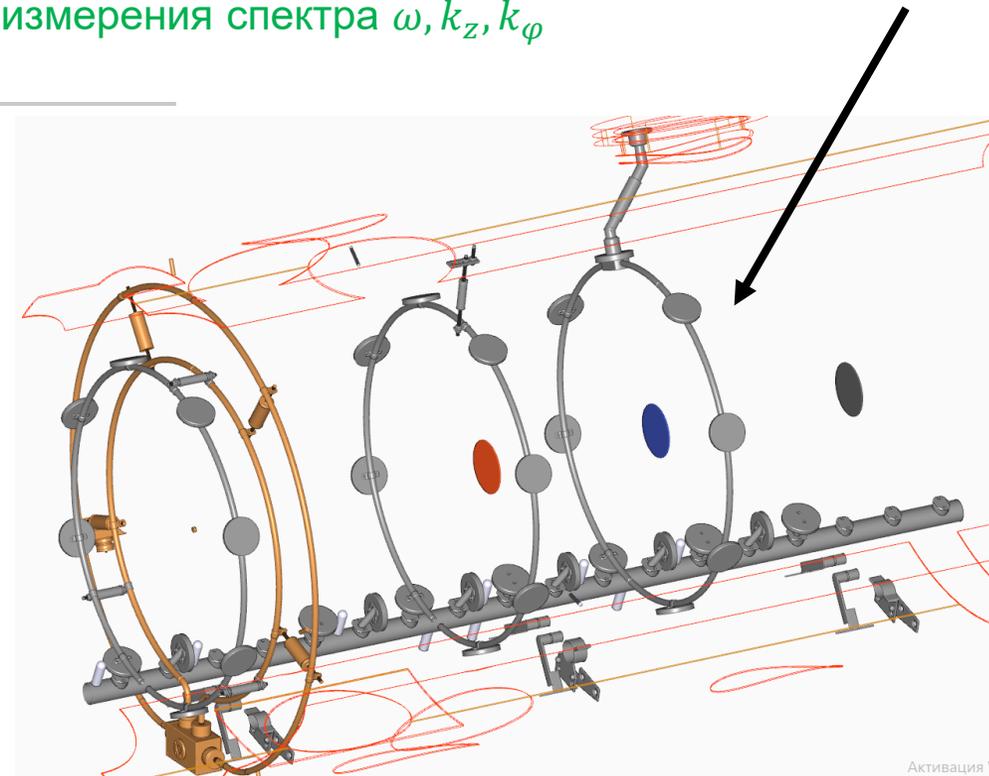
# Динамика радиальных профилей относительного давления плазмы при АИЦН



Радиальные профили  $\frac{\Delta B}{B_0}$  по MSE  
до развития АИЦН и после АИЦН

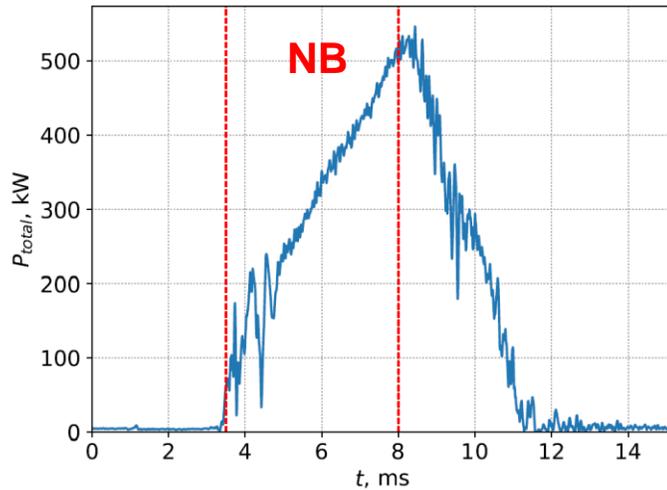
Предварительный вывод: при развитии АИЦН происходит сдвиг максимума плотности быстрых ионов вдоль оси к центру и переход к более пологому и монотонному радиальному профилю

- Динамика пространственных профилей относительного давления быстрых ионов при АИЦН более выражена в режиме  $\delta = 1.5$
- Накоплена значительная статистика измерений MSE и магнитных зондов в этом режиме, проводится обработка данных
- В производстве находится модернизированная система магнитных зондов для измерения спектра  $\omega, k_z, k_\varphi$

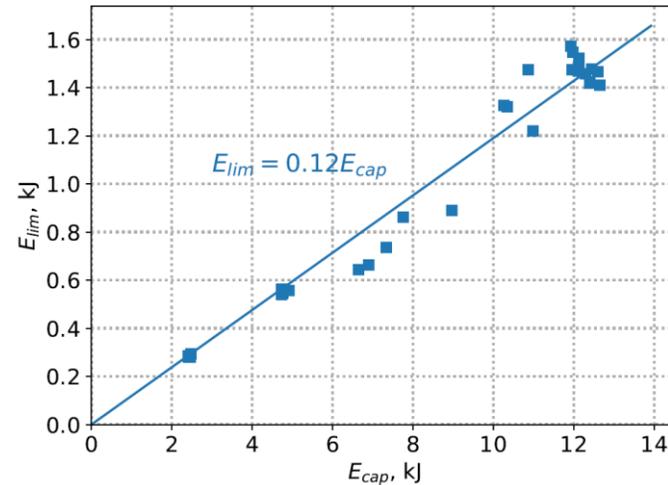


# Эксперименты на ГДЛ

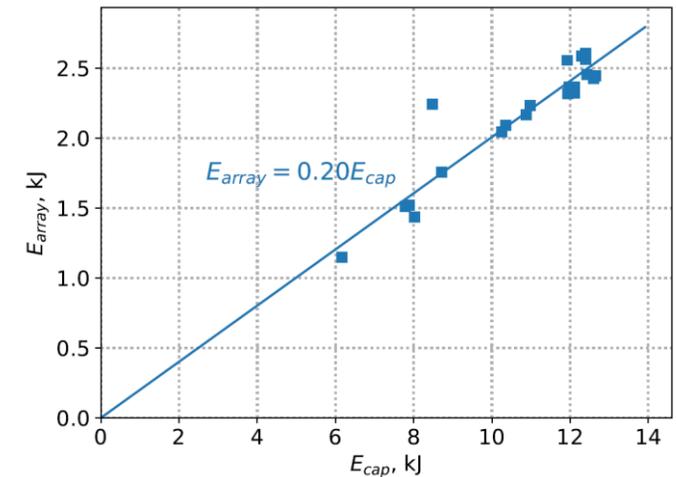
## Баланс мощности нагрева и потерь энергии из плазмы



Сигнал полной мощности на один приемник плазмы в расширителе ГДЛ (продольные потери, 16%)



Суммарная энергия, попадающая на радиальные лимитеры ГДЛ в зависимости от захваченной энергии (поперечные потери, 12%)

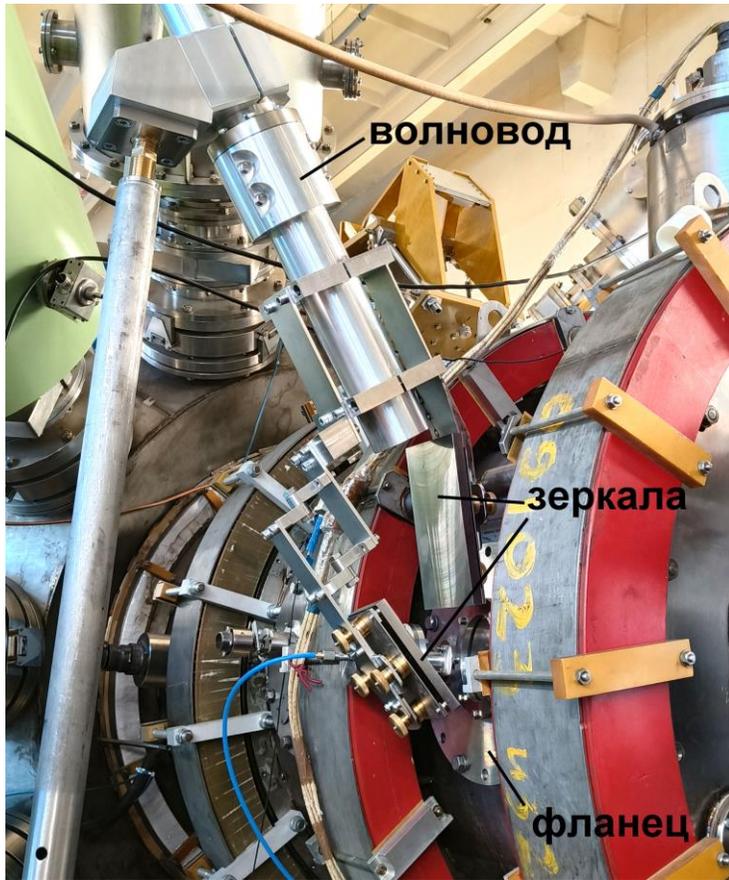


Суммарная энергия потерь на перезарядку и излучение по измерениям линейкой болометров в зависимости от захваченной энергии, 20%.

Измеренные потери энергии (интеграл по времени) =  $2 * 16\% + 12\% + 2 * 20\% = 84\%$   
от захваченной энергии атомарных пучков

# Эксперименты на ГДЛ

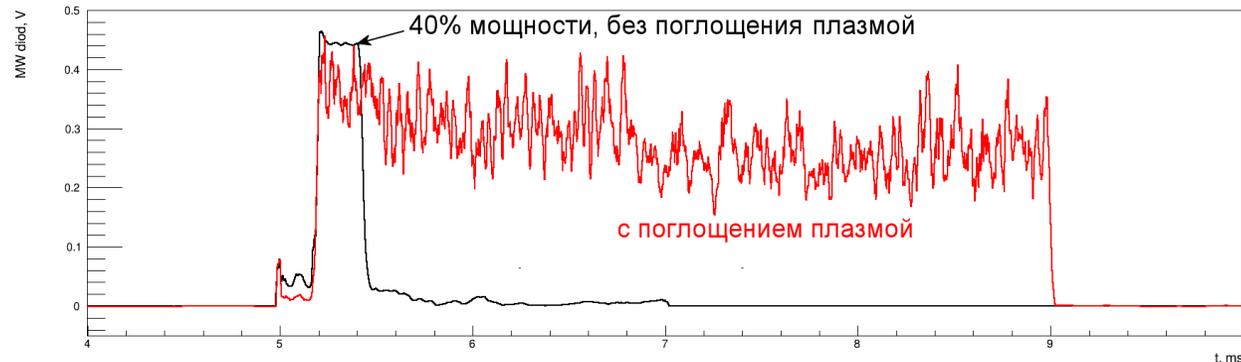
## Нагрев электронной компоненты на второй гармонике ЭЦР



Волновод и зеркала ввода излучения в ГДЛ новой системы ЭЦРН-Х2

- Предыдущие эксперименты с нагревом электронов плазмы в ГДЛ на 1-й гармонике ЭЦР (2 гиротрона x0.4 МВт, О-волна) были успешны и показали  $T_e \approx 1$  кэВ.
- Использование 2-й гармоники выглядит более привлекательным с т.з. физики взаимодействия СВЧ-излучения с плазмой и решения инженерных проблем

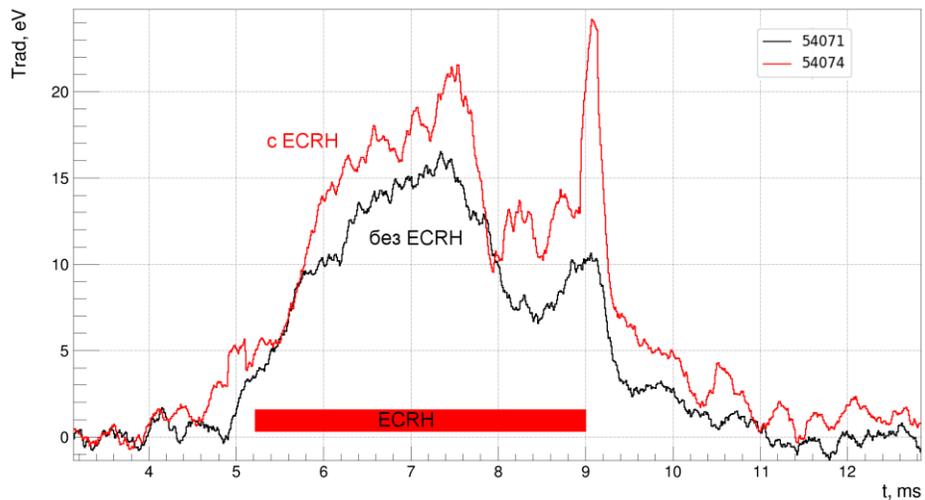
Запущен новый гиротрон GLGD 54.5/0.8/0.05 с мощностью 0.5 МВт (4 мс)



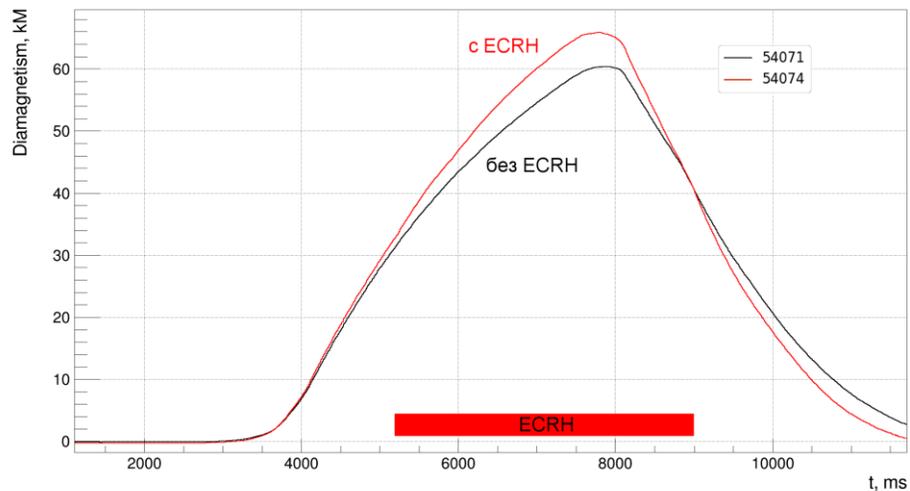
Относительные сигналы рассеянной мощности в вакуумной камере ГДЛ с плазмой и без плазмы (СВЧ диод).

Захват оценивается как <50%.

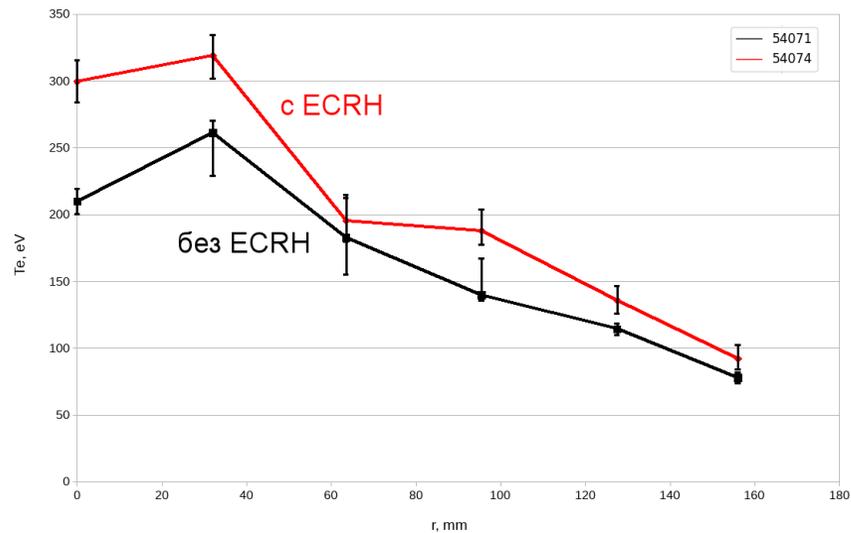
# Нагрев электронной компоненты плазмы в ГДЛ на второй гармонике ЭЦР



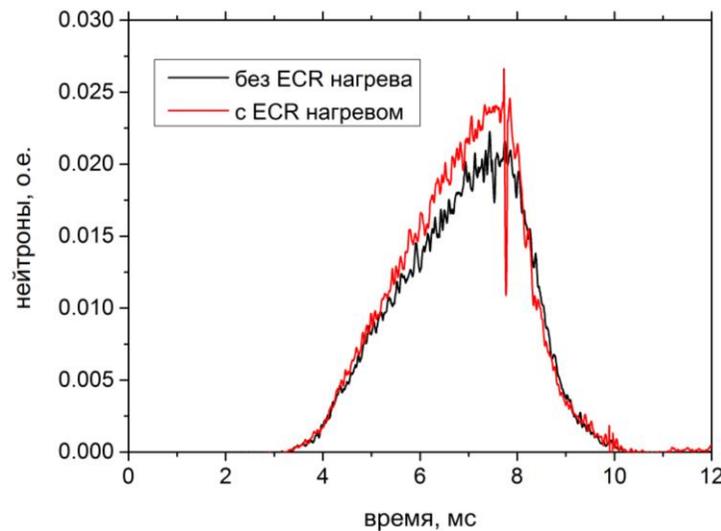
Радиационная температура  
(гетеродин. радиометр)



Диамагнетизм быстрых ионов



Радиальные профили  $T_e$   
(томс. рассеяние,  
центр)



Поток D-D нейтронов  
(сцинт. детектор снаружи  
вакуумной камеры)

## Нагрев электронной компоненты плазмы в ГДЛ на второй гармонике ЭЦР:

промежуточный итог и дальнейшие планы

На сегодня: измерения показывают увеличение электронной температуры, а также параметров быстрых ионов при инъекции СВЧ мощности 0.4 МВт на 2-й гармонике X-волны в ГДЛ

---

### Дальнейшие планы:

- ❖ Увеличение мощности до 0.8 МВт, оптимизация работы гиротрона
- ❖ Абсолютные измерения инжектируемой и захваченной мощности
- ❖ Реализация различных сценариев нагрева плазмы при помощи ЭЦР на X2, а также диагностики при помощи коллективного томсоновского рассеяния (на ГДЛ есть 2 гиротрона, системы питания и транспортировки СВЧ пучков)

# Коллективное томсоновское рассеяние (CTS) на ГДЛ совместно с ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

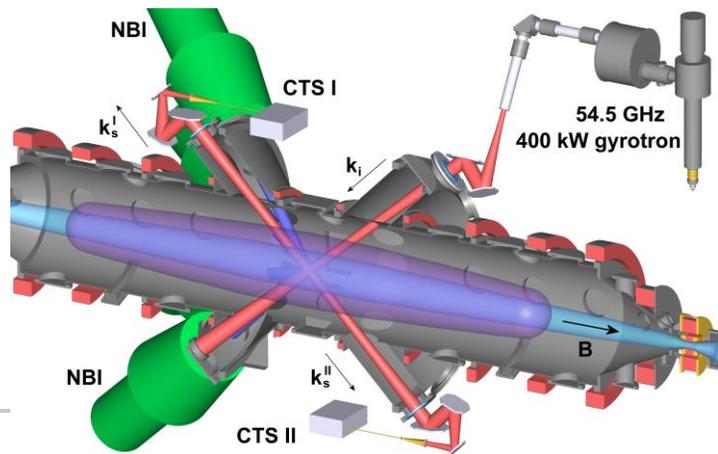
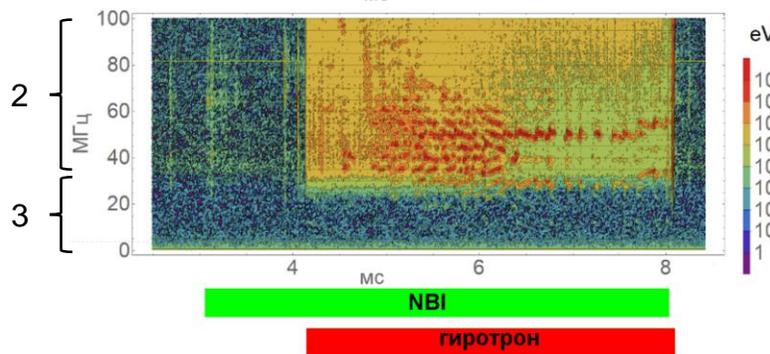
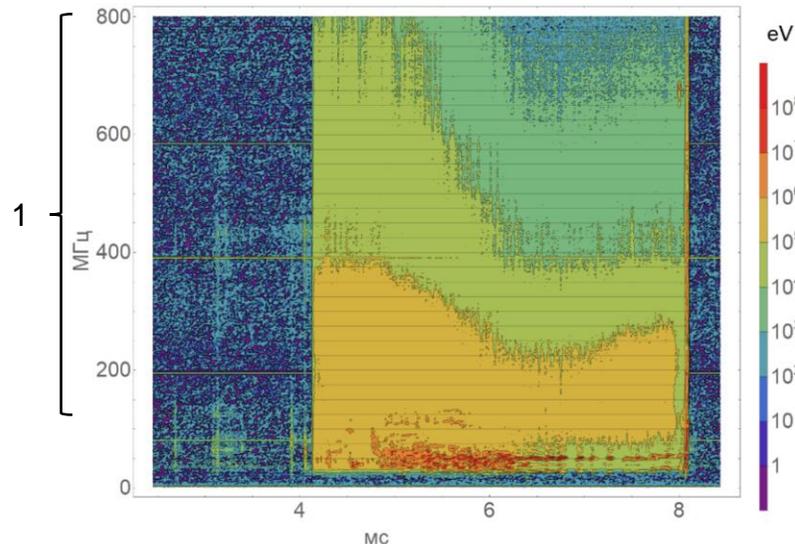
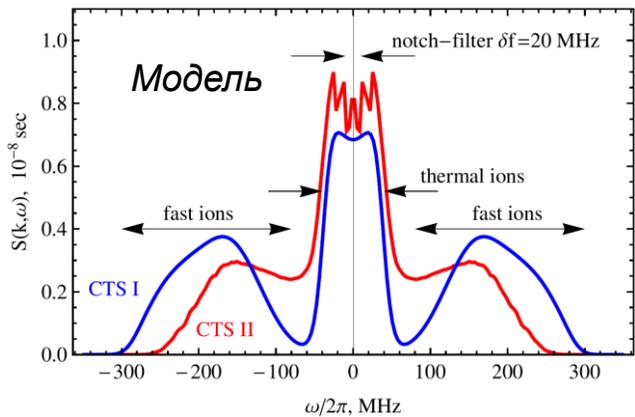


Схема CTS O-O, реализованная в центре ГДЛ (старый гиротрон)

В спектре рассеяния СВЧ волны на электронах есть флуктуации  $(\omega, \vec{k})$ , вызванные горячими ионами:  $\omega = \vec{k}\vec{V}_i$ , а также турбулентностью.

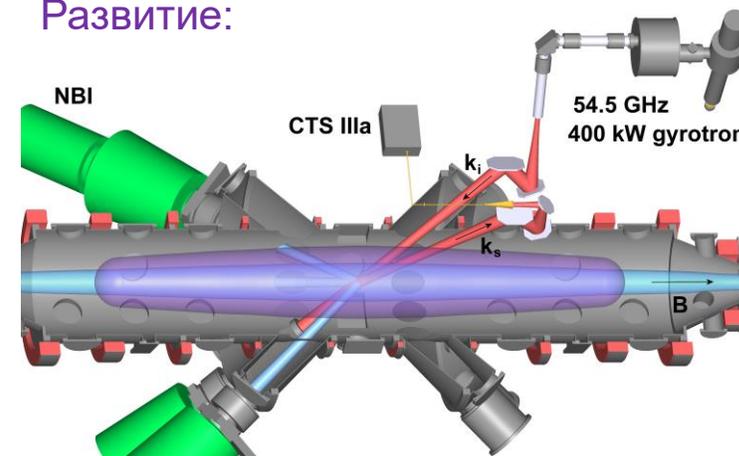


Динамический спектр рассеяния в плазме ГДЛ

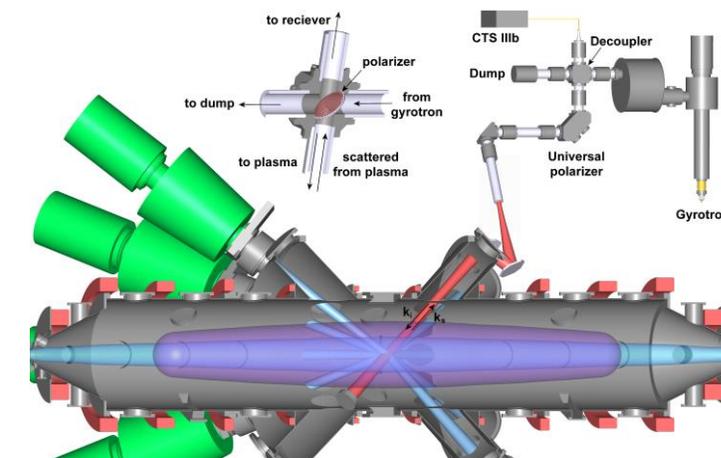
1. Горячие ионы
2. Холодные ионы, кинетические неустойчивости плазмы
3. Электроны, «паразит»

2. ГДЛ: диагностики и приборы

Развитие:

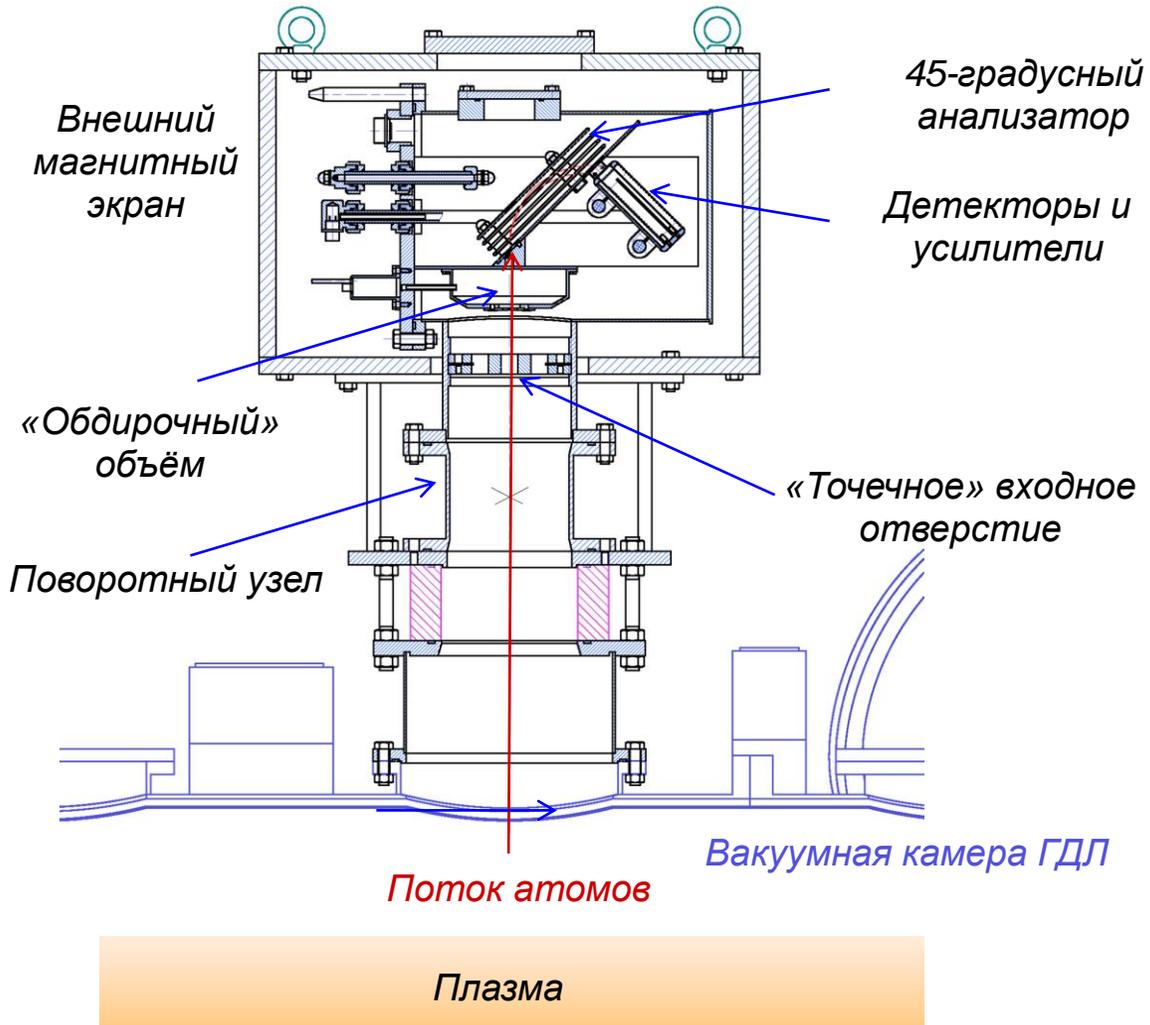


❖ Новые схемы наблюдения рассеяния назад X-X

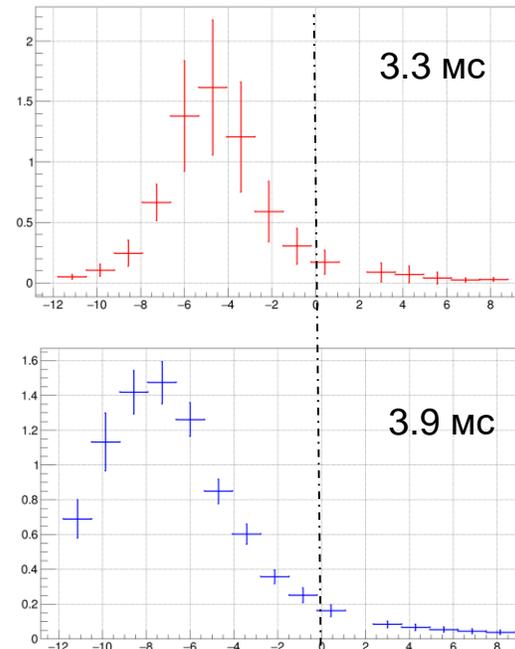


❖ Регистрация спектров в экспериментах с ЭЦРН

# Анализатор атомов перезарядки на ГДЛ



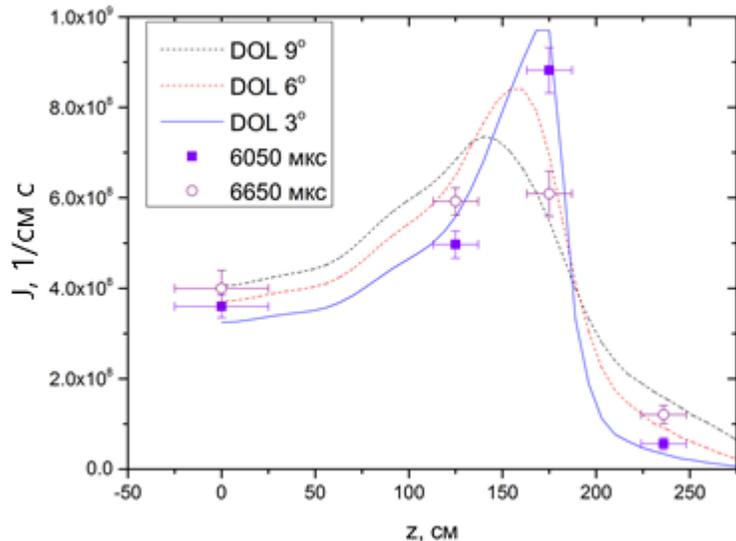
- 16 каналов вдоль диаметра плазмы, одна энергия.
- Область наблюдения:  
20 см по диаметру (примерно совпадает с диаметром плазмы) × 5 см вдоль оси.
- Энергия регистрируемых ионов 5-20 кэВ, энергетическая ширина 5%.
- В 2023 году сделаны новые усилители детекторов AXUV (меньше шумы, подавлено взаимное влияние каналов).



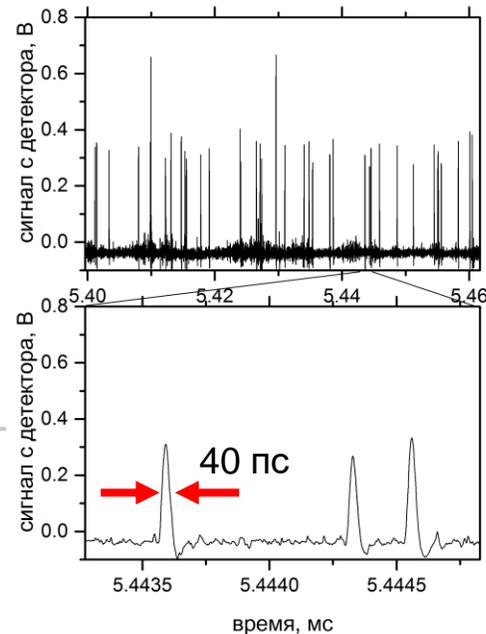
Поперечные профили потока атомов перезарядки  $E=14$  кэВ (пассивный сигнал, без диагностического пучка)

Начальная асимметрия – смещение на ларморовский радиус

# Детекторы и системы регистрации продуктов термоядерной реакции



Продольный профиль интенсивности термоядерной реакции D-D (точки — эксперимент, линии — расчёт).



Сигнал детектора 3 МэВ протонов D-D реакции.

## Физические задачи на ГДЛ:

- Проведение абсолютных измерений интенсивности термоядерной реакции для изучения удержания быстрых ионов
- Изучение микронеустойчивостей, влияющих на удержание быстрых ионов



Детектор 3 МэВ протонов с новым усилителем

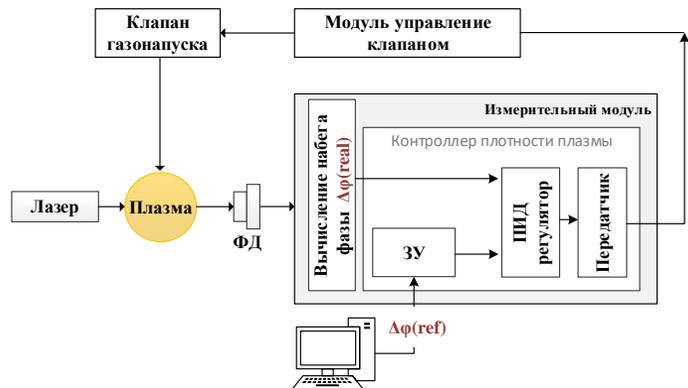


АЦП 12 бит 500 МГц

## Развитие электроники:

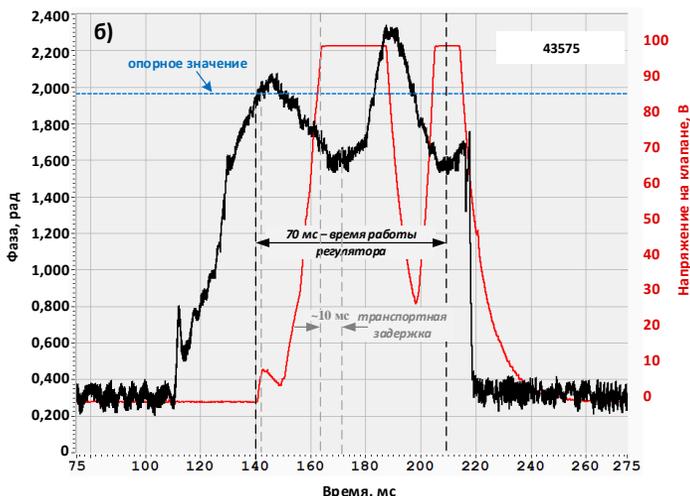
- Широкополосные усилители с малым шумом для Si-диодов большой ёмкости (100 пФ) для регистрации протонов
- АЦП 12 бит 500 МГц с режимом  $n/\gamma$ -спектрометра, реализованного в FPGA (для сцинт. детектора)

# Регистраторы формы импульсов с обработкой данных в FPGA



Линейка АЦП с FPGA для реализации реконфигурируемых алгоритмов обработки данных с детерминированным временем исполнения:

- АЦП 12 бит, 500 МГц (2 канала) с режимом  $n/\gamma$ -спектрометра
- АЦП 14 бит, 125 МГц (2 канала), реализована обработка данных ДИ с генерацией сигнала управления (Глобус-М2)



Блок-схема ДИ с контроллером инъекции газа на Глобус-М2, сигнал линейной плотности ДИ, **сигнал управления**.

Линейка новых АЦП на базе SoC Altera Cyclone-V (ARM/FPGA) с унифицированным интерфейсом управления (драйвер EPICS):

- АЦП 14 бит, 250 МГц (4 канала) со страничным режимом по внешнему/внутреннему запуску (СКИФ)
- АЦП 12 бит, 80 МГц (8 каналов)

Быстрые регистраторы на базе SCA (цифровой узел на SoC Cyclone-V) :

- DRS-ADC (модуль 2 канала) на микросхеме DRS4 (4 шт., 4096 точек на канал)
- Частота регистрации в SCA – 5 ГГц (2 пс/точка)
- Страничный режим с остановкой по внешнему импульсу синхронизации
- **Задачи: диагностика пучка в СКИФ (аналогичные приборы – томс. рассеяние ГДЛ)**

## Дальнейшие планы

- ❑ Ввод в эксплуатацию двух атомарных пучков 15 кэВ, 120 А на установке САТ и начало экспериментов по созданию сгустков плазмы с большой анизотропией ионной функции распределения и относительным давлением  $\approx 1$  (апрель 2024).
- ❑ Анализ данных по динамике пространственных профилей давления плазмы при развитии АИЦН и других кинетических неустойчивостей в ГДЛ, подготовка и проведение эксперимента по стабилизации проводящей стенкой (февраль 2024+).
- ❑ Улучшение систем питания двух гиротронов, транспортировки и диагностики СВЧ излучения (март 2024).
- ❑ Оптимизация режима создания плазмы для эффективного поглощения СВЧ на второй гармонике ЭЦР. Эксперименты с нагревом электронов и достижения максимальной электронной температуры, плотности, энергии и давления быстрых ионов в различных конфигурациях области удержания (март 2024+).
- ❑ Запуск диагностики MSE-LIF и эксперименты с измерением пространственного профиля  $\vec{B}$  в плазме с разрешением  $\sim 100$  Гс (февраль 2024+).
- ❑ Модернизация диагностик томсоновского рассеяния (11 точек по времени) и коллективного томсоновского рассеяния (2 или 3 линии наблюдения, улучшенное пространственное разрешение и точность) для измерения функций распределения электронов, быстрых ионов, спектров турбулентности плазмы (июнь 2024).
- ❑ Участие в дальнейшем развитии проекта установки ГДМЛ.