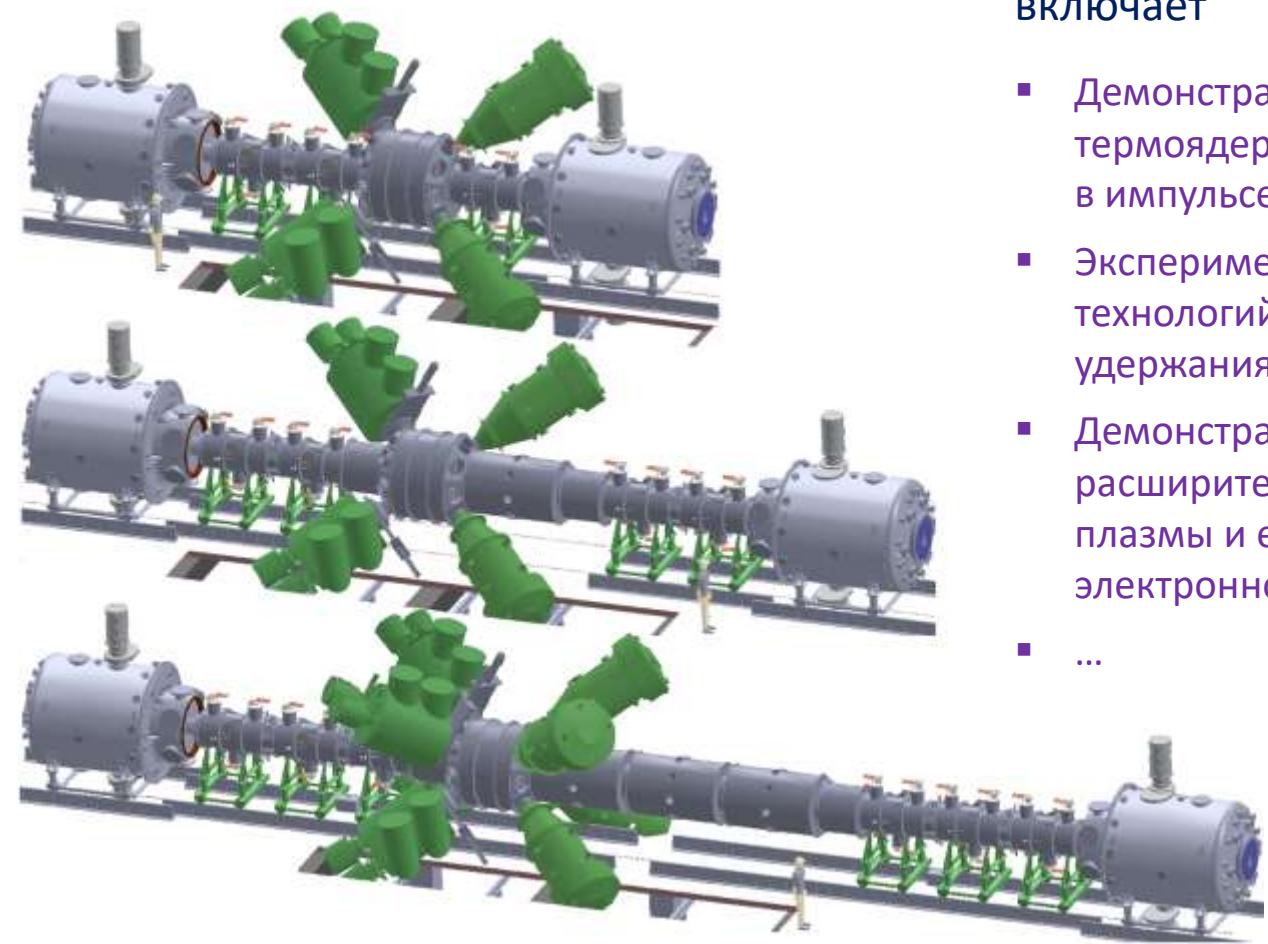


Работы лаборатории 9-1 по поддержке  
проекта газодинамической  
многопробочной магнитной ловушки

*А. Лизунов и коллектив лаб. 9-1*

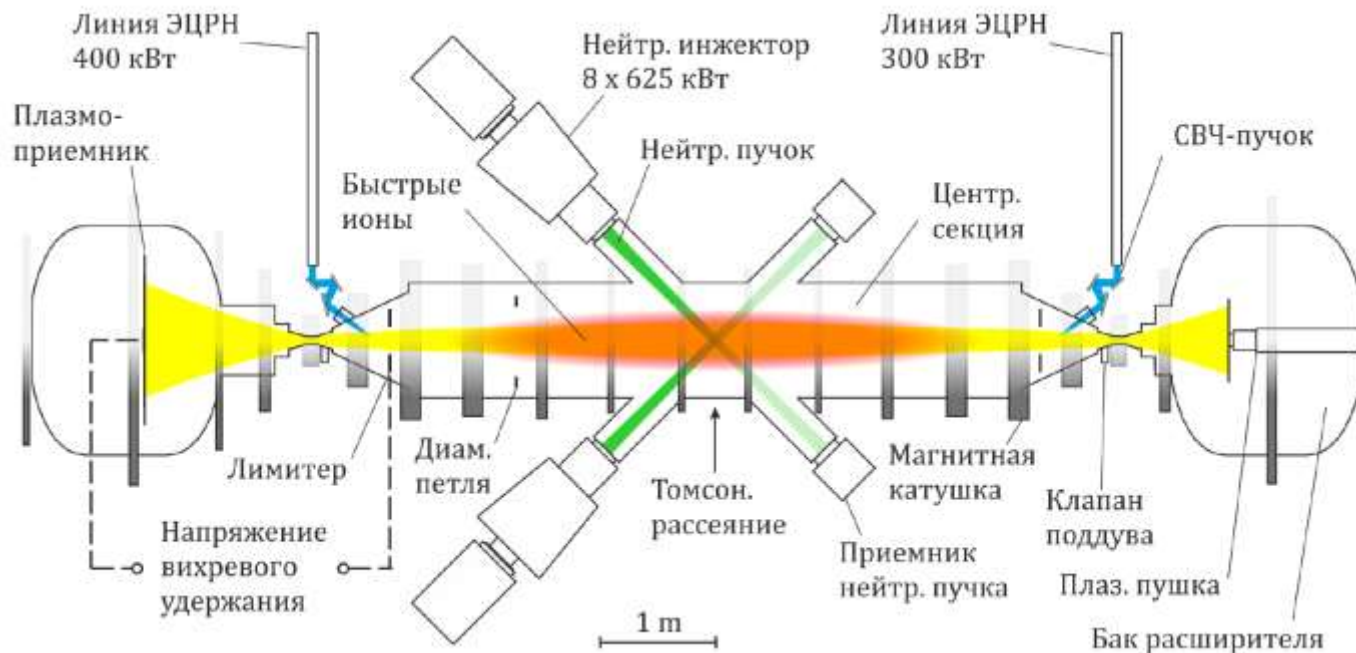
Список научных задач проекта ГДМЛ включает

- Демонстрацию удержания плазмы с суб-термоядерными параметрами,  $\beta \approx 1$  и  $Q > 0.1$  в импульсе более 1 с;
- Экспериментальную проверку новых технологий, в том числе диамагнитного удержания плазмы;
- Демонстрацию эффективности диверторов-расширителей для приёма истекающей плазмы и её термоизоляции по электронному каналу
- ...



- I. Основные результаты экспериментов на ГДЛ в 2017 г. и ближайшие планы
- II. Подготовка эксперимента по генерации плазменного сгустка с  $\beta \approx 1$  в линейной магнитной ловушке
- III. Разработка новых диагностик для плазменного эксперимента
- IV. Разработка приборов и технологий для метрологического обеспечения исследований
- V. Заключение

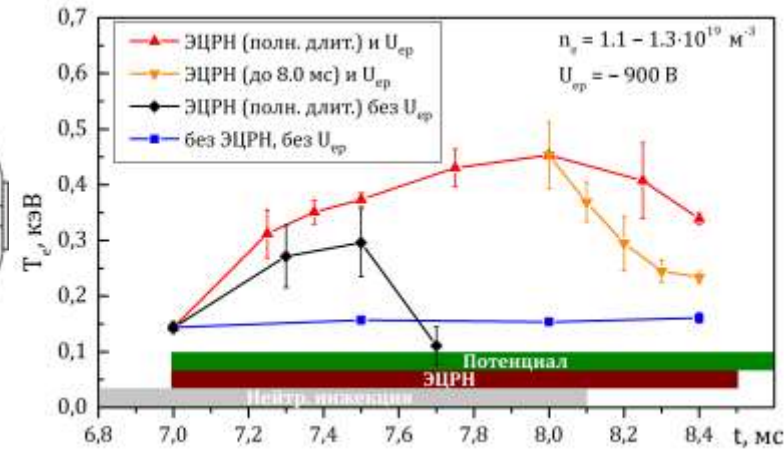
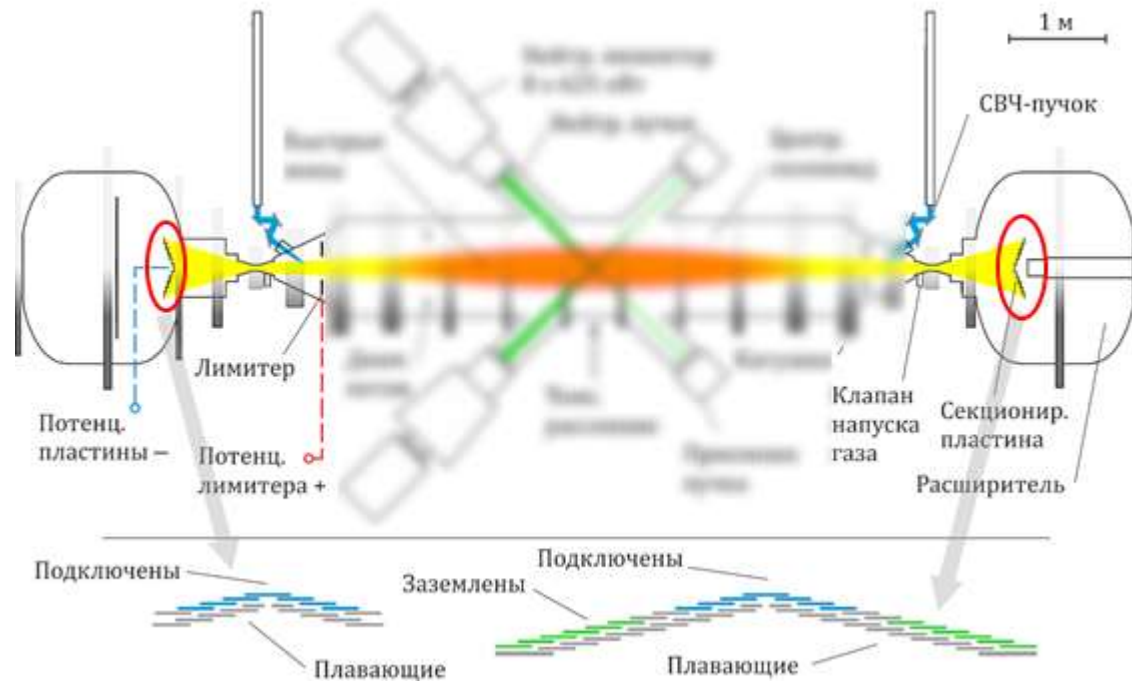
# I. Основные результаты эксперимента на ГДЛ в 2017 г.



## Предшествующие экспериментальные кампании на установке ГДЛ

- Продемонстрировали удержание плазмы с 10-кэВ ионами с относительным давлением ( $\beta$ ) до 0.6;
- С применением дополнительного ЭЦР-нагрева плазмы мощностью 0.7 МВт, позволили получить электронную температуру плазмы 1 кэВ;

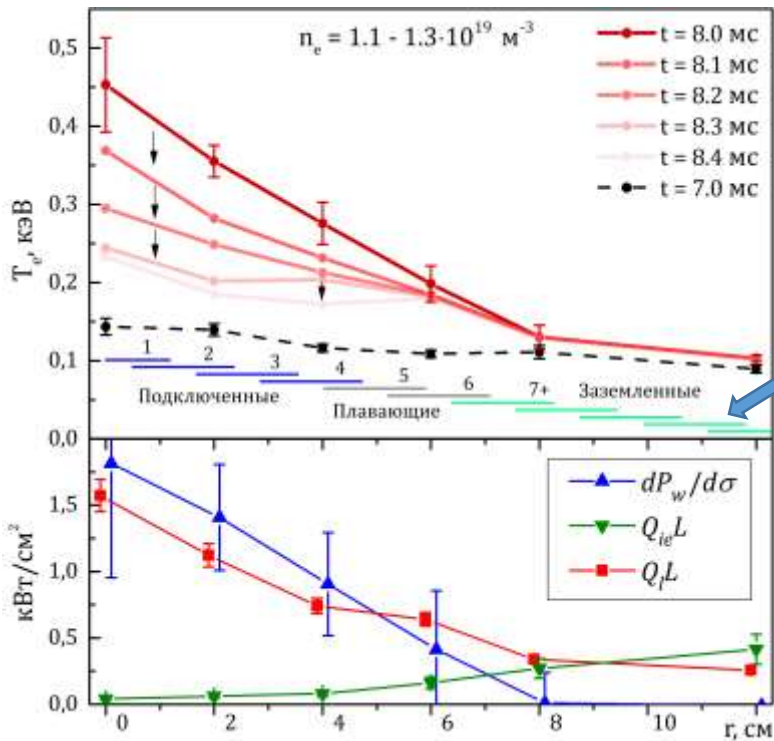
# Стабилизация плазмы при локальном ЭЦР-нагреве (1)



Динамика электронной температуры на оси плазмы

- ❖ В ГДЛ установлены секционированные абсорберы плазмы (см. рис.) для формирования оптимального распределения потенциала плазмы по радиусу
  - Для обеспечения МГД-устойчивости, величина потенциала  $\sim T_e/e$  (400 В .. 1 кВ);
  - В режиме «вихревого удержания» с низким уровнем поперечного переноса, на периферии плазмы образуется узкий слой со скачком потенциала и дифференциальным вращением.

# Стабилизация плазмы при локальном ЭЦР-нагреве (2)



Радиальные профили электронной температуры в различные моменты времени при мощности ЭЦР-нагрева 400 кВт

Распределение потенциала по секциям абсорбера плазмы

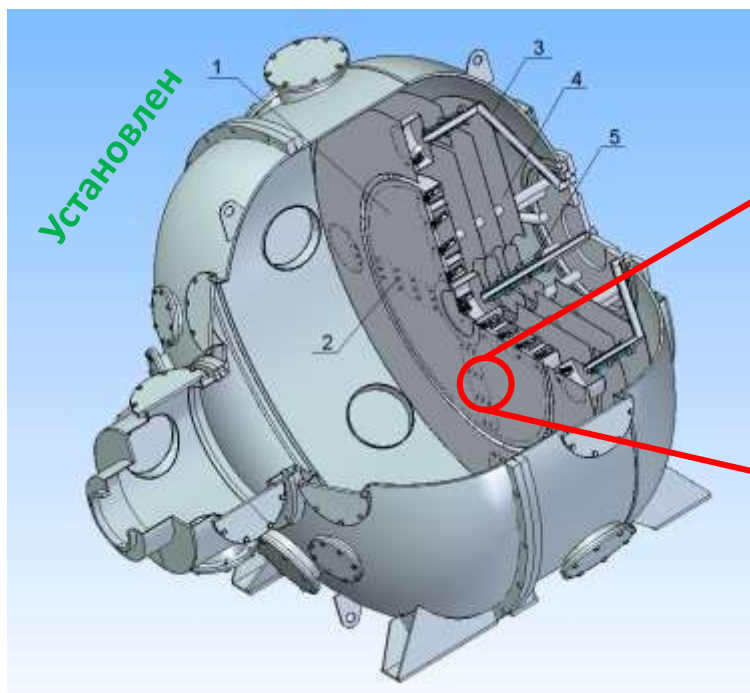
Радиальные профили плотности мощности нагрева и потери энергии из плазмы по электронному каналу

- При ЭЦР нагреве, формируется стационарный в течение 1.5 мс профиль электронной температуры с максимумом  $\approx 450$  эВ и характерным радиусом 6 см (радиус лимитера 15 см);
- МГД-устойчивый режим удержания плазмы достигается в широком диапазоне радиальной формы распределения потенциала на секциях абсорбера;
- Переход в МГД-устойчивый режим происходит при  $U \leq U_{th} \approx -450$  В, при дальнейшем уменьшении потенциала параметры плазмы существенно не меняются.

## Выводы по результатам работы:

- Впервые на установке ГДЛ достигнут стабильный разряд с электронной температурой до 450 эВ в течение 1.5 мс при мощности СВЧ-нагрева 400 кВт;
- Измеренные значения  $T_e$  находятся в соответствии с максимальными значениями, достигнутыми ранее, учитывая значительно возросшую плотность плазмы и в два раза меньшую мощность нагрева;
- Анализ параметров плазмы на стадии остывания позволил вычислить важную фундаментальную величину  $A = 4.6 \pm 0.4$  – коэффициент, связывающий  $T_e$  со средней энергией, «выносимой» электроном, покинувшим ловушку вдоль магнитного поля;
- Поток энергии поперек магнитного поля оказался менее 5% от продольных потерь;
- Созданы условия для дальнейшего увеличения  $T_e$  при увеличении мощности СВЧ нагрева, а также условия для детального изучения поперечного транспорта энергии.

# Ближайшие планы экспериментов на ГДЛ (1)

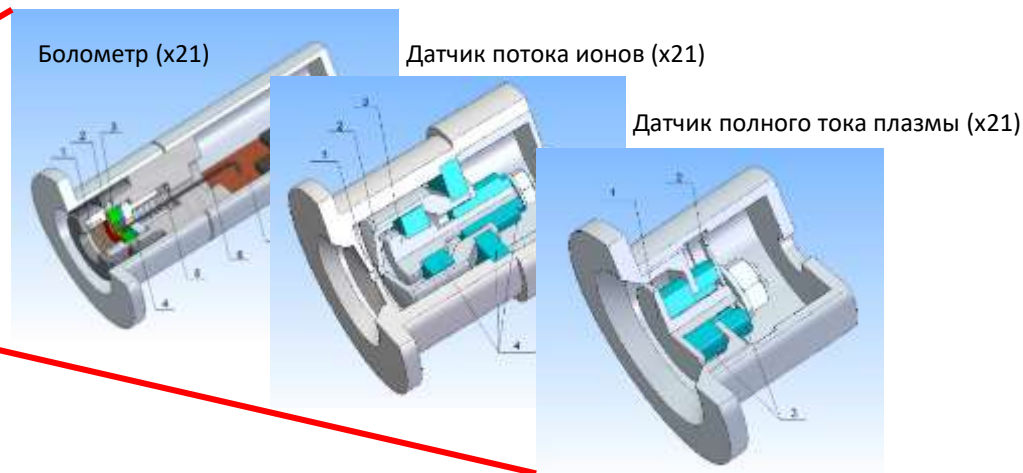


Торцевой бак ГДЛ с новым абсорбером плазмы. 1 – основной диск абсорбера, 2 – датчики, 3 – опоры, 4 – защитные экраны, 5 – проходные изоляторы

Эксперимент будет обеспечен большим объёмом данных измерений:

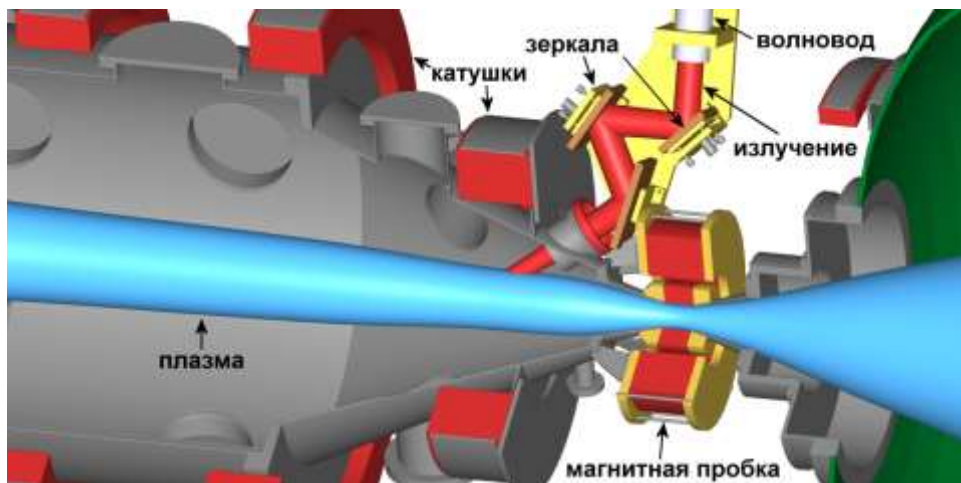
- Датчики на поверхности абсорбера;
- Новые оптические диагностики;
- Анализатор продольных энергий ионов
- Зонды (периферия)

## Детальное изучение физики расширителя:



- Влияние температуры и концентрации частиц (электронов, ионов, атомов, молекул) в области расширителя на параметры плазмы в центре;
- Измерение пространственного распределения электростатического потенциала, определяющего термоизоляцию плазмы в центральной части по электронному каналу;
- Анализ динамики плазмы в расширителе
- ...

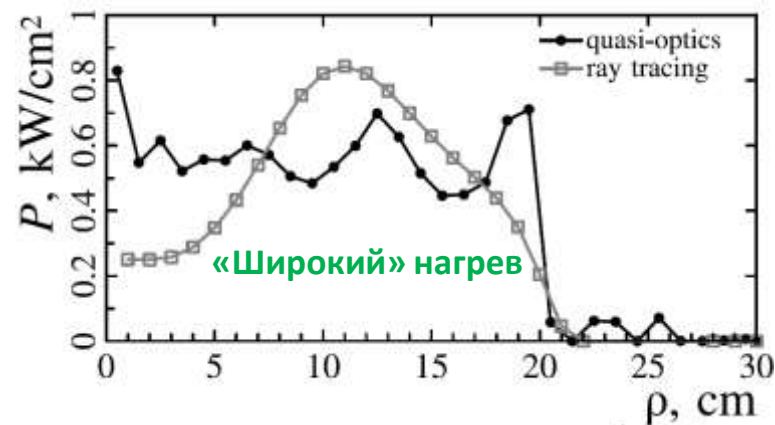
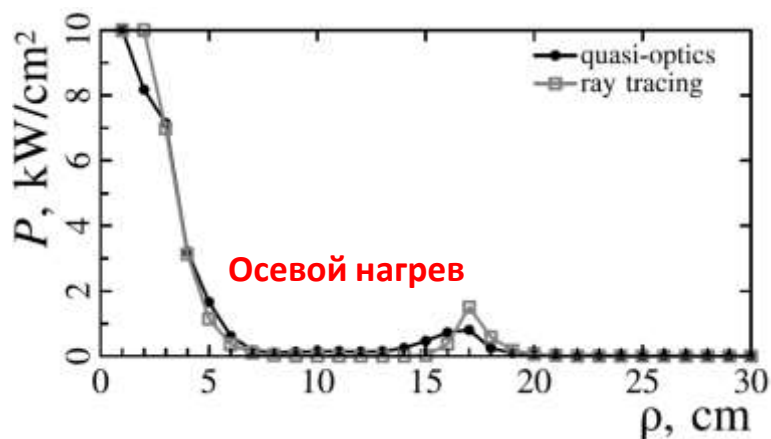




## Совершенствование метода СВЧ-нагрева плазмы в ГДЛ и определение наилучшей стратегии его использования для ГДМЛ:

- Реализация режима с широким профилем поглощения;
- Изучение перспективности нагрева на второй гармонике ЭЦР с использованием имеющихся гиротронов на 75 ГГц.

Схема ввода СВЧ-пучка вблизи магнитной пробки ГДЛ



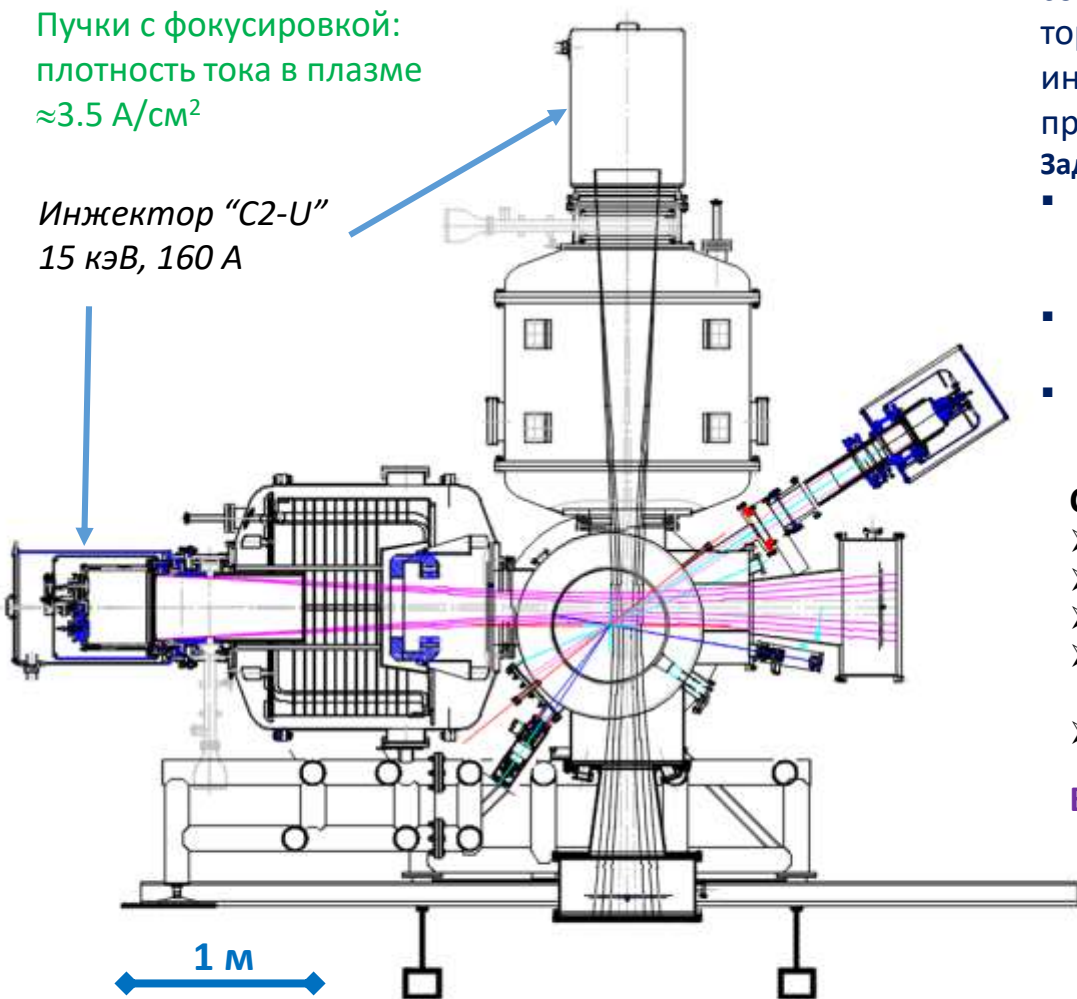
Радиальный профиль энерговклада при инжекции СВЧ

# II. Подготовка эксперимента по генерации плазменного сгустка с $\beta \approx 1$ в линейной магнитной ловушке

Участники проекта: лаб. 9-0, 9-1, 6-0, 1-4, НКО

Пучки с фокусировкой:  
плотность тока в плазме  
 $\approx 3.5 \text{ A/cm}^2$

Инжектор "C2-U"  
15 кэВ, 160 А



## Установка CAT (Compact Axisymmetric Toroid)

создаётся для генерации компактного тороидального плазменного сгустка при 90°-инжекции мощных атомарных пучков в короткую пробочную ловушку.

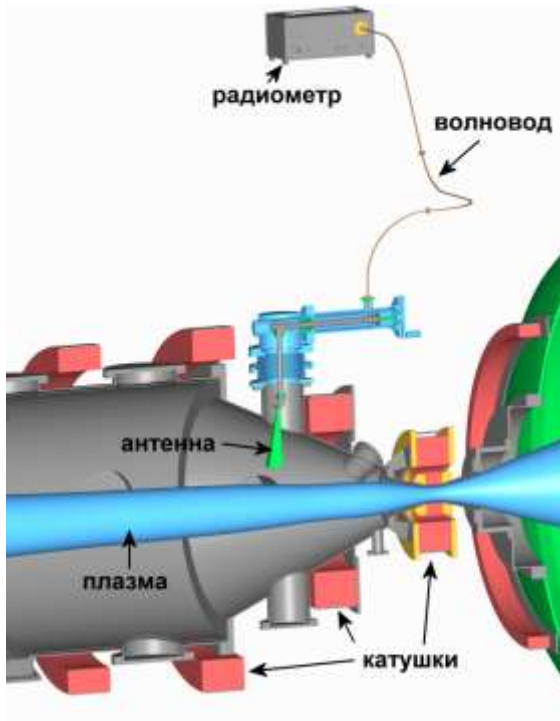
### Задачи:

- Образование конфигурации с обращением (инверсией) магнитного поля за счёт кольцевого диамагнитного тока захваченных ионов;
- Экспериментальная проверка концепции диамагнитного удержания плазмы высокого давления;
- Отработка методов стабилизации плазмы и других технологий, необходимых для ГДМЛ.

### Статус

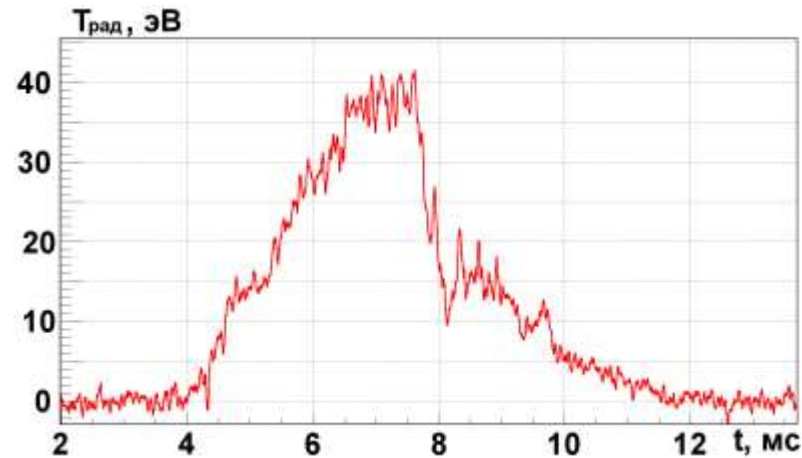
- Компоненты установки: ЭП 4353/11059 н.ч. (40%);
- Системы питания магн. поля: начато производство;
- Система атомарной инжекции: начато производство;
- Инфраструктура (электропитание, вода, азот, пр.): начато проектирование;
- Диагностики: начато производство.

Ввод в эксплуатацию планируется в 2019 г.



*Конструкция и схема  
расположения элементов  
диагностики на ГДЛ*

- Определение средней температуры электронов по измерению мощности теплового излучения плазмы в диапазоне СВЧ (10..100 ГГц)



- Поиск оптимальных условий для эффективного ЭЦР нагрева плазмы: чем больше мощность теплового излучения, тем больше поглощение излучения в данном спектральном диапазоне

# Оптическая томография плазмы

Диагностический порт №2  
21 линия наблюдения

Диагностический порт №1  
21 линия наблюдения

Измерительный  
модуль с  
интерференционным  
фильтром и тремя  
ЛФД с усилителями

Край абсорбера  
плазмы

## Физические задачи:

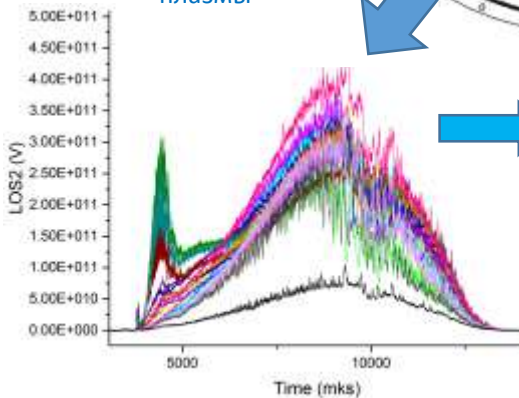
- Изучение пространственных профилей плотности нейтральной компоненты плазмы в расширителе;
- Изучение динамики плазмы в расширителе в диапазоне частот до 1 МГц

## Основные параметры системы:

- 42 линии наблюдения;
- Модульная конструкция;
- Выбор участка спектра при помощи узкополосных интерференционных фильтров ( $D\alpha$  и  $H\alpha$  - 656.2 нм);
- Детекторы излучения – ЛФД (QE 85% на 650 нм);
- Широкополосные усилители сигнала с максимальным соотношением сигнал/шум;
- Абсолютная калибровка всех каналов по интенсивности для количественных измерений плотности атомов.

Камера  
расширителя  
ГДЛ

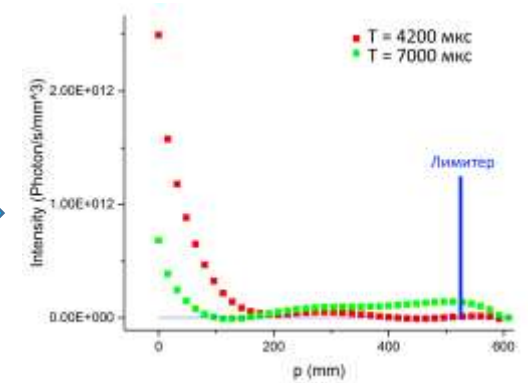
2 м



➔ Вычисление локальной интенсивности

1-d ➔

2-d: разработка кодов



# Двумерные изображения плазмы в оптическом диапазоне

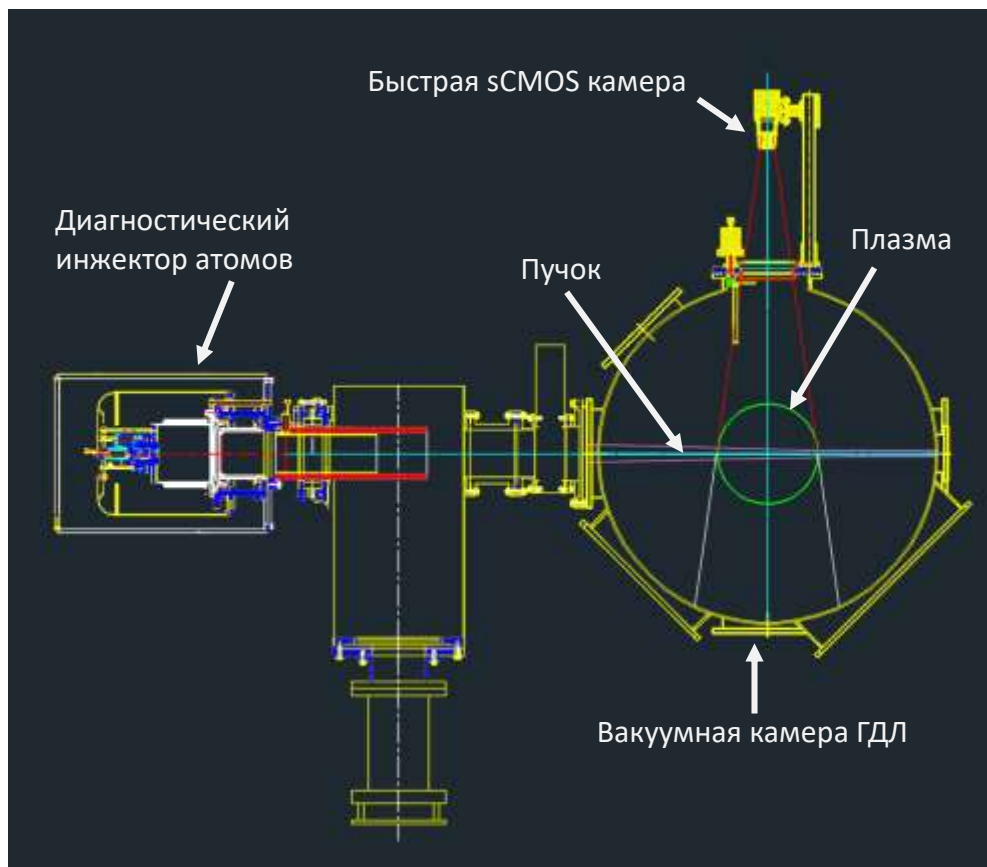
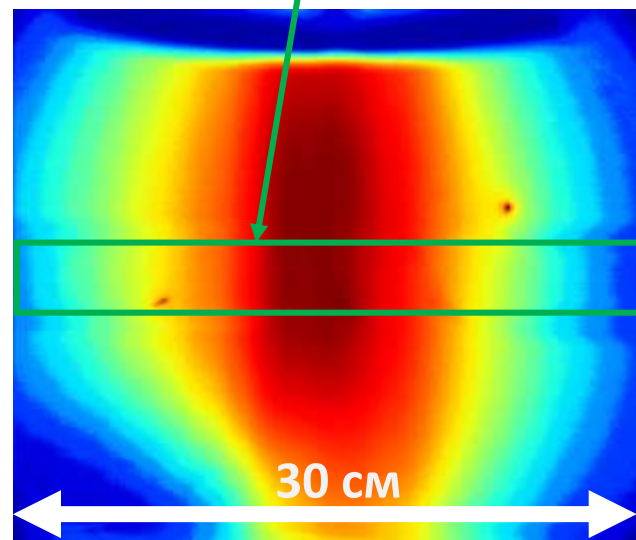


Схема диагностики в поперечном сечении ГДЛ, соответствующем пикам давления анизотропной плазмы

Регистрация изображений «плазма + пучок» позволяет вычитать фон и вычислять поперечный профиль плотности плазмы (метод находится на стадии экспериментальной проверки)

## Частота кадров:

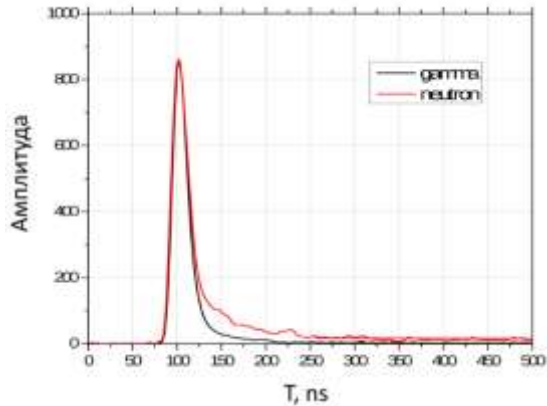
- Режим с полным кадром (5М пикс.) – 100 Гц
- Режим с уменьшенным кадром – 3 кГц.



Пример изображения плазмы (без пучка)  
Экспозиция 10 мкс

- ❖ Видны UFO: ярко светящиеся частицы (металла конструкции), летящие со скоростью  $\sim 100$  м/с

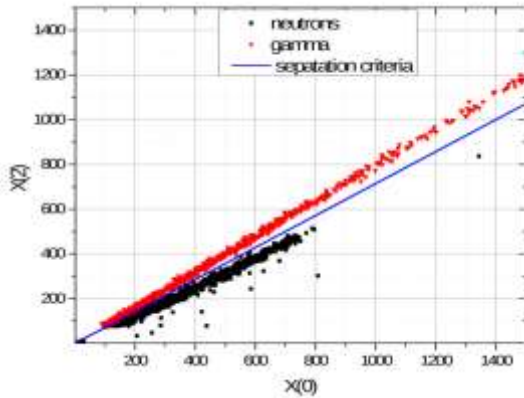
При измерении потока и спектра нейтронов, **необходимо учитывать вклад  $\gamma$ -квантов**



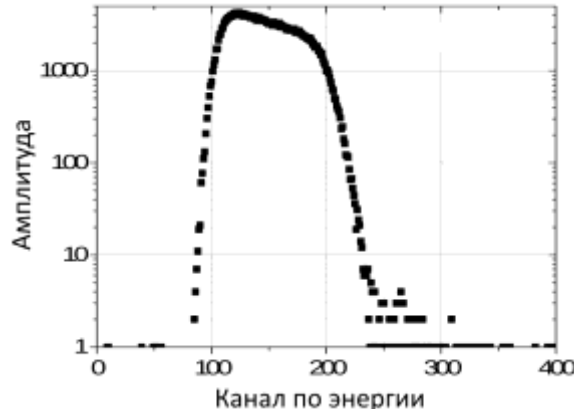
Один из методов: разделение по длительности высвечивания в сцинтилляторе.

**Создан компактный прибор на основе**

- Сцинтиллятора (монокристаллический стильбен);
- ФЭУ ET Enterprises 9266B;
- АЦП 12 бит, 500 МГц;
- ПЛИС для обработки импульсов и построения спектра в реальном времени с длительностью интервала накопления статистики 100 мс;
  - используется частотно-градиентный анализ сигналов.



Разделение  $n/\gamma$  по отношению амплитуд гармоник Фурье-спектра импульсов



Пример: спектр нейтронов DD реакции, измеренный на ГДЛ

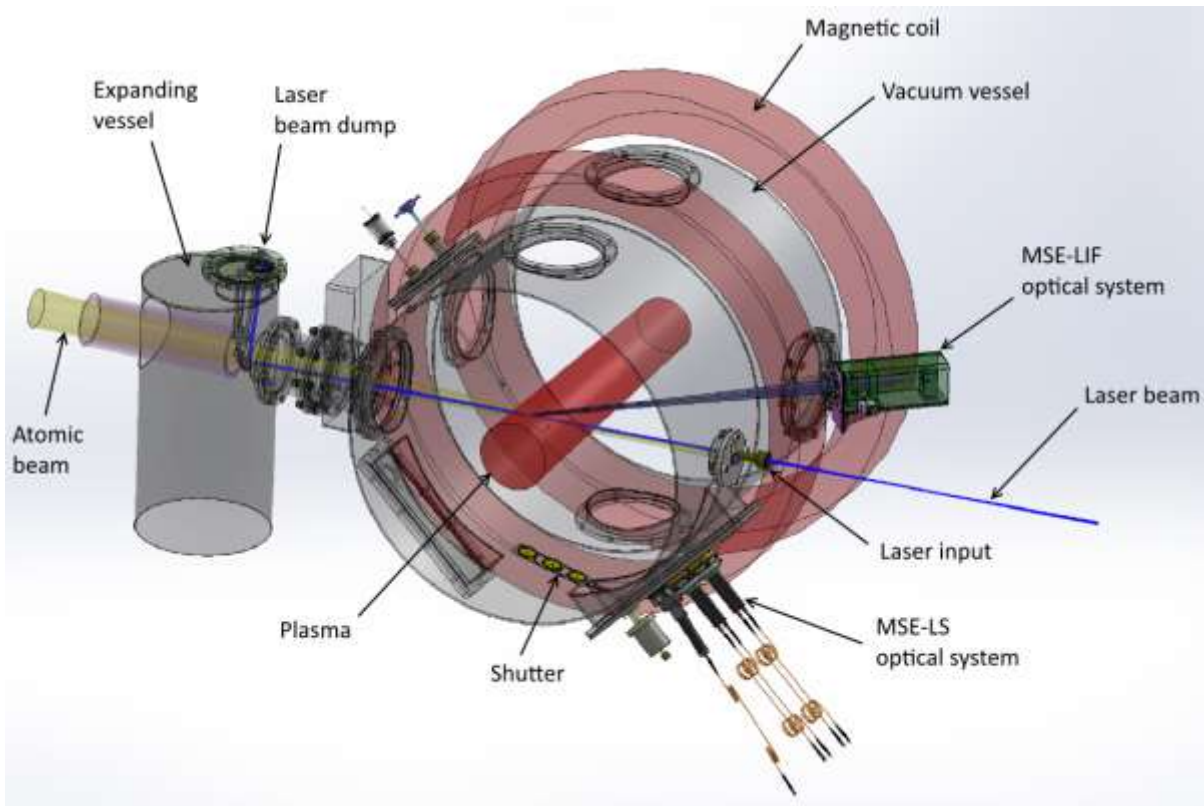
**Возможности применения прибора:**

- Контроль спектра нейтронов на ядерных электростанциях;
- Измерение интенсивности DD и DT реакций, измерение спектра нейтронов в плазме установок с магнитным удержанием
- ...

# Разработка диагностики MSE-LIF (1)

Измерение магнитного поля  $\sim 0.01$  Т в плазме по анализу излучения диагностического пучка дейтерия

- Базовый метод: динамический эффект Штарка (расщепление линии D- $\alpha$ ) используется для измерений  $|B|$  в ГДЛ
- + лазер-индуцированная флуоресценция (LIF): резонансное возбуждение оптических переходов лазерным излучением. Разрешение определяется шириной линии генерации лазера.



## Методика реализации:

- Уменьшение разброса продольной скорости атомарного пучка (уменьшение доплеровского уширения линий излучения);
- сканирование длины волны лазера по штарковскому спектру атомов пучка  $\Rightarrow$  индукция маг. поля  $|B|$ . Разрешение по времени определяется периодом сканирования.
- сканирование поляризации лазера  $\Rightarrow$  направление вектора  $B$ . Разрешение по времени определяется периодом модуляции.

## Задачи:

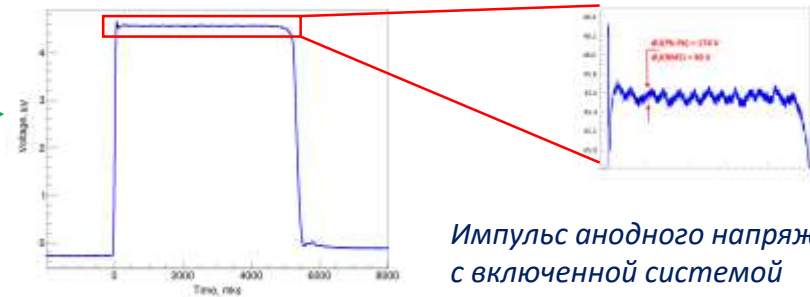
- ❖ измерение профиля (по 8-ми точкам) величины и направления вектора магнитного поля в плазме в эксперименте на ГДЛ и CAT.

Проект диагностики MSE-LIF на ГДЛ в точке остановки быстрых ионов (максимум давления). Используется существующий диагностический пучок дейтерия DINA-5M с параметрами: энергия 50 кэВ, ток до 4 А.

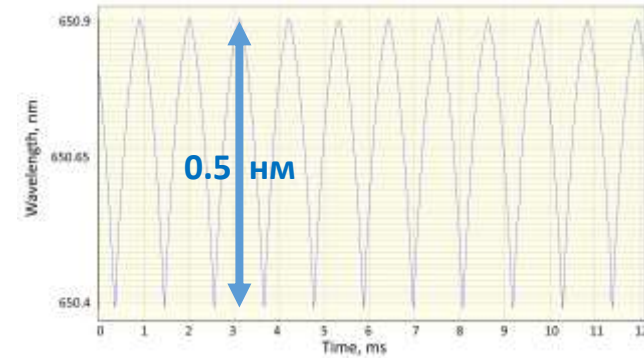
# Разработка диагностики MSE-LIF (2)

## Статус

- Стабилизация энергии инъекции атомарного пучка. **Достигнуто 50 кэВ  $\pm$  50 эВ.** →
- Разработка оптической системы сбора излучения пучка. **Производство завершено.**
- Разработка системы ввода и вывода лазерного пучка. **Производство завершено на 75%.**
- Разработка фотодетекторов и системы регистрации сигналов. **Производство завершено, система на этапе настройки и тестирования.**
- Разработка системы управления. **Производство завершено, система на этапе настройки и тестирования.**
- Лазерная система и система модуляции поляризации. **Завершено тестирование на оптическом стенде: период сканирования длины волны лазера  $T = 1$  мс, период «качания» поляризации  $t = 20$  мкс.** →



Импульс анодного напряжения с включенной системой активной стабилизации



Скан длины волны лазера с периодом 1 мс.

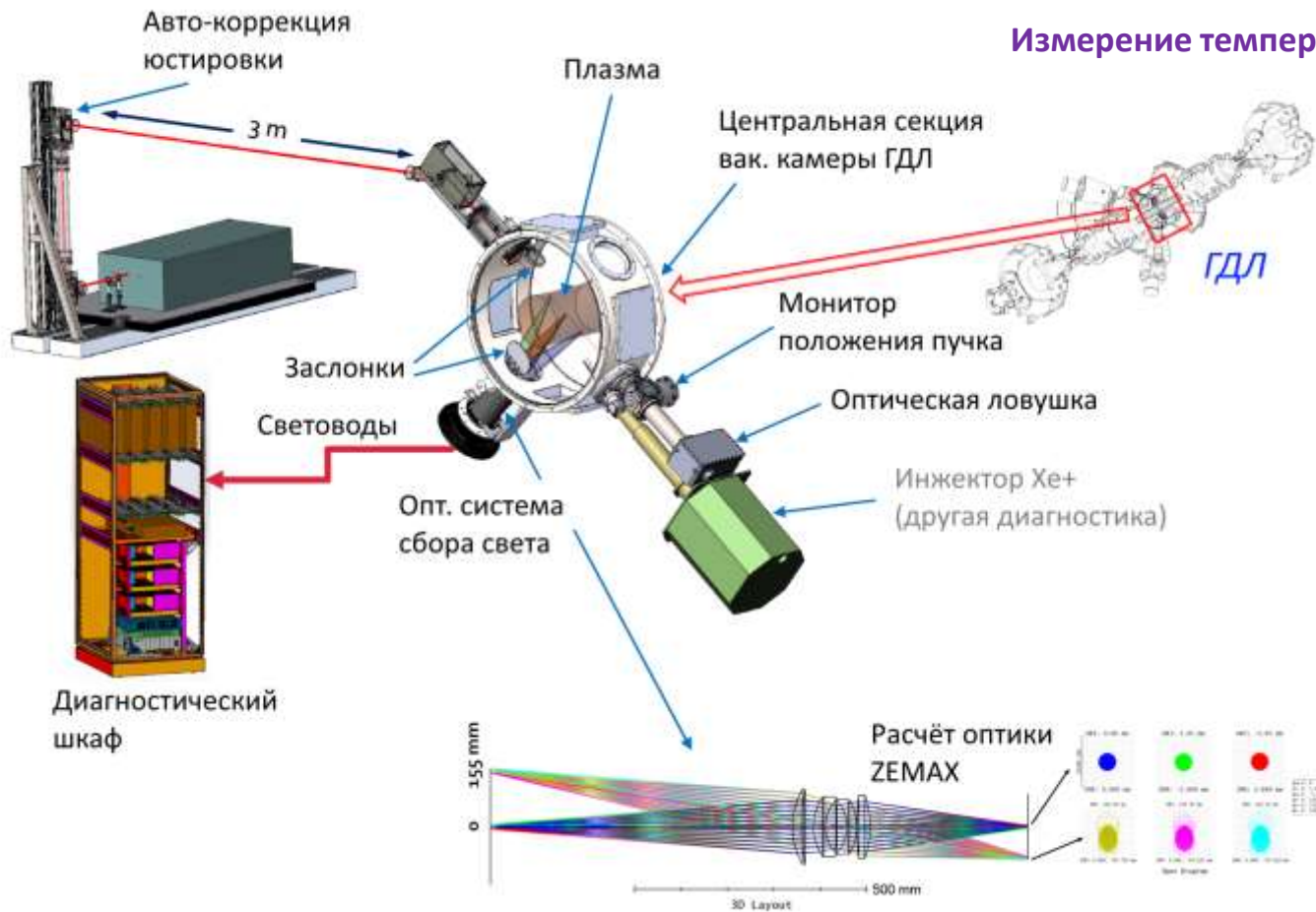
## Планы

- Сборка и начало экспериментов на ГДЛ: **2018 г. Q3,4.**

Лазер на красителе с накачкой лазером  $Nd:YVO_4$  на 2-й гармонике (ООО «Техноскан», Технопарк Академгородка).



# Разработка диагностики лазерного томсоновского рассеяния (1)



## Измерение температуры и плотности электронов

### Проектные параметры

- Лазер Nd:YAG 1мкм, 1.7 Дж;
- 11 точек на диаметре плазмы (1-я очередь: 6 точек);
- Оптическая система сбора света f/4, ахромат, с малыми aberrациями;
- Разрешение 10x1 мм;
- Линия транспортировки лазерного пучка с авто-коррекцией по обратной связи от монитора положения пучка;
- Модульная система регистрации оптических сигналов: 1 точка – 1 спектрометр;
- Спектрометр: на базе интерф. фильтров (6 каналов), вся электроника обработки данных на борту;
- Спектрометры и система управления в экранированном шкафу с термостабилизацией.

Общая схема диагностики на ГДЛ

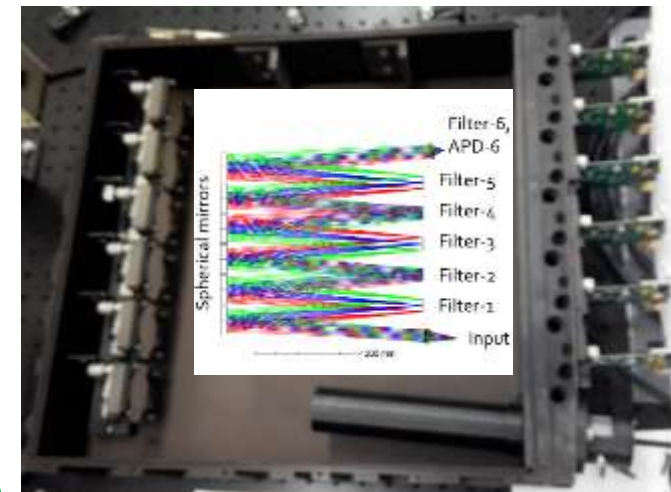
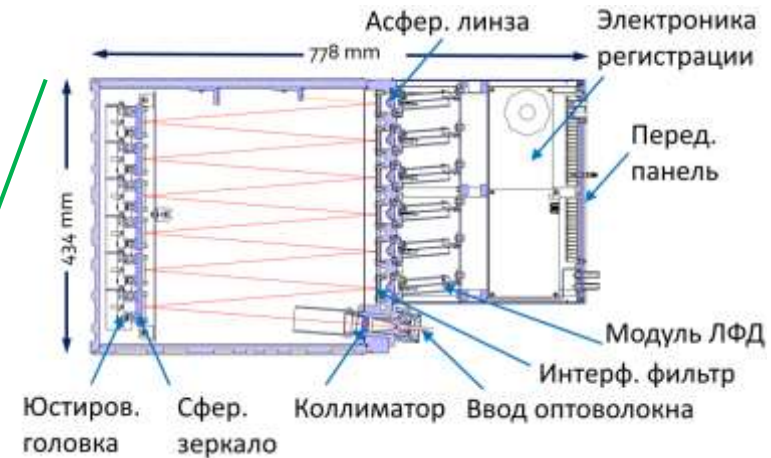
# Разработка диагностики лазерного томсоновского рассеяния (2)

## Статус

- Лазерная система: на опт. стенде проведено моделирование линии транспортировки, испытания на лучевую стойкость всех элементов;
- Линия ввода лазерного пучка: в ЭП, готовность 50%;
- Линия вывода лазерного пучка: производство завершено;
- Оптическая система сбора света: производство завершено;
- Спектрометры: производство завершено, приборы на этапе сборки, юстировки оптики и калибровки. Электроника на борту: модули ЛФД с усилителями откалиброваны. Система регистрации сигналов на этапе отладки.
- Система управления: на этапе разработки и отладки, готовность 60%.
- Система регистрации данных: производство завершено, компоненты на этапе отладки и тестирования.

## Планы

- Готовность спектрометров к пилотным измерениям: май 2018 г;
- Испытания спектрометра в эксперименте на ГДЛ: май 2018 г;
- Окончательная сборка диагностики на ГДЛ: сентябрь 2018 г;
- Начало измерений: октябрь 2018 г.



*Конструкция, ход лучей и фото спектрометра в процессе сборки*

# Разработка измерителя потенциала плазмы на основе пучка $\text{Xe}^+$

Совместная работа с лаб. 9-0

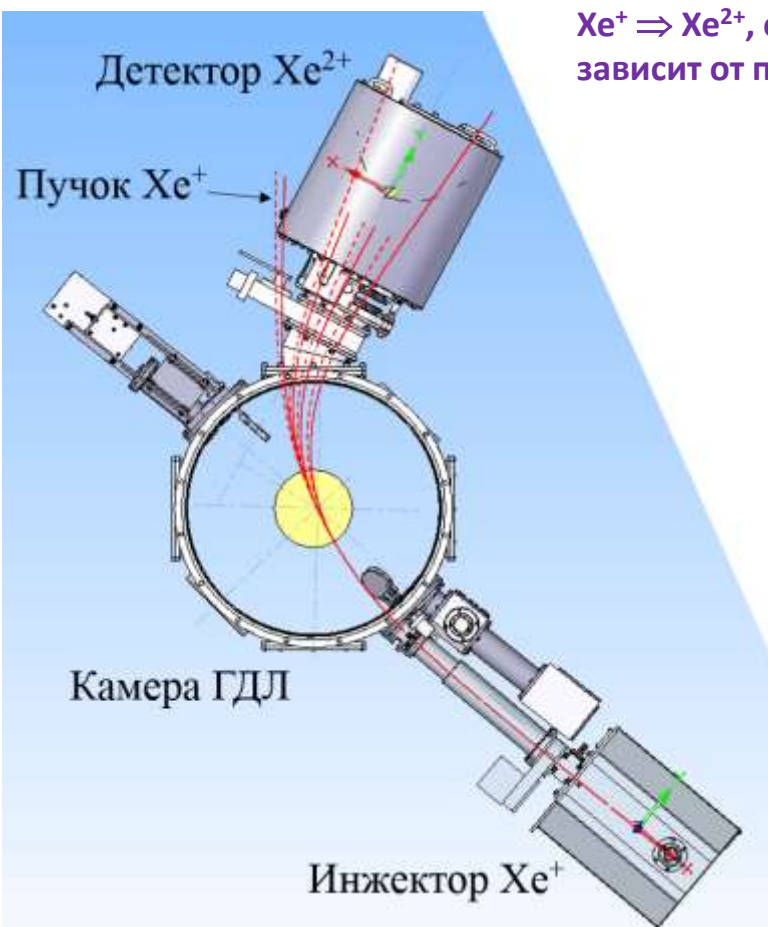


Схема диагностики и расчётные траектории пучков в ГДЛ

$\text{Xe}^+ \Rightarrow \text{Xe}^{2+}$ , его точка попадания на позиционно-чувствительный детектор зависит от потенциала места образования

## Проектные параметры

### Пучок $\text{Xe}^+$

- энергия 60..75 кэВ (настройка зависит от магнитного поля);
- ток до 7 мА;
- размер 4x20 мм;
- угловая расходимость 4 мрад.

### Детектор

- 8 точек измерения, расположенных вдоль траектории  $\text{Xe}^+$ ;
- пространственное разрешение (радиус) 2 см;
- разрешение по времени 1 мкс;
- разрешение по энергии 10 В.

## Статус

- Инжектор пучка  $\text{Xe}^+$ : производство завершено, система на этапе отладки (лаб. 9-0);
- Детекторный модуль: в производстве.
- Система регистрации сигналов: производство завершено.

## Планы

- Завершение производства, сборка, отладка и начало экспериментов на ГДЛ в 2018 г.

# IV. Разработка приборов и технологий для метрологического обеспечения исследований (1)

Разработка синхронных многоканальных регистраторов формы импульса 12 бит 5.5 ГГц на базе микросхем быстрой аналоговой памяти (SCA, Switched Capacitor Array)

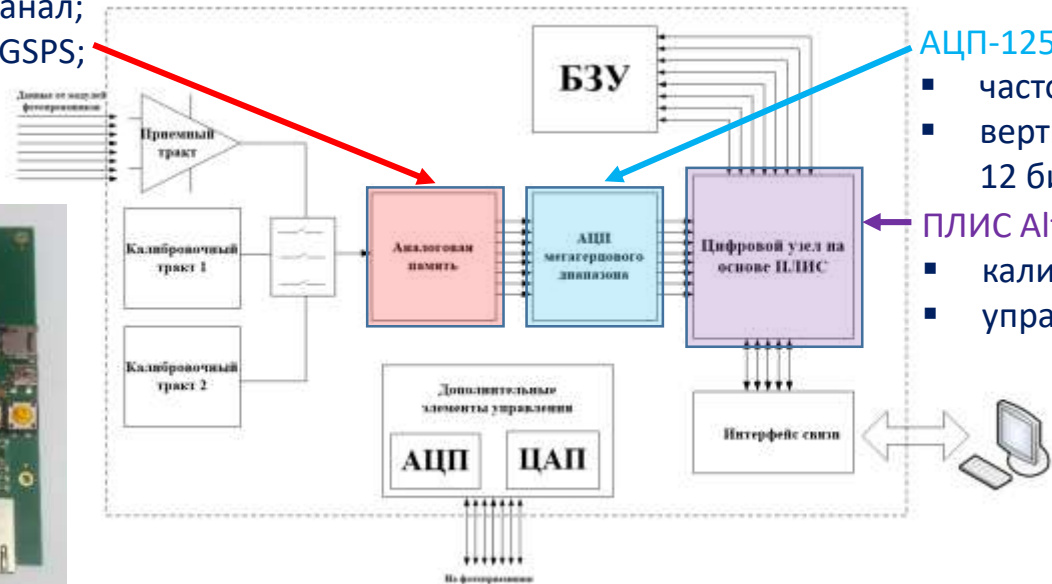
Рыночная стоимость быстрых АЦП

При большом количестве каналов, собственная разработка может быть экономически оправдана.

Произв.	Модель	Частота	Разреш.	К-во каналов	Память	Цена
Teledyne	ADQ7DC	5 ГГц	14 бит	2	4 Гб	\$15,000
Keysight	U5303A	4 ГГц	12 бит	2	4 Гб	\$15,000
GaGe	TB3-EON	6 ГГц	12 бит	2	2 Гб	\$15,870
Наш	прибор	5.5 ГГц	12 бит	8	1 Гб	\$1,000

Кристалл DRS4

- 9 каналов, 1024 точки/канал;
- частота выборки до 5.5 GSPS;
- дифф. входы 950 МГц;
- дифф. выходы на АЦП;



АЦП-1250

- частота выборки 50 MSPS;
- вертикальное разрешение 12 бит.

ПЛИС Altera

- калибровка;
- управление.

Фотография и блок-схема системы регистрации на базе SCA DRS4, версия для ЛР ГДЛ

# IV. Разработка приборов и технологий для метрологического обеспечения исследований (2)

Контракт с ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», совместно с лаб. 2

Разработка макета системы обработки данных вертикальной нейтронной камеры ИТЭР (сигналы алмазных детекторов и камер деления)

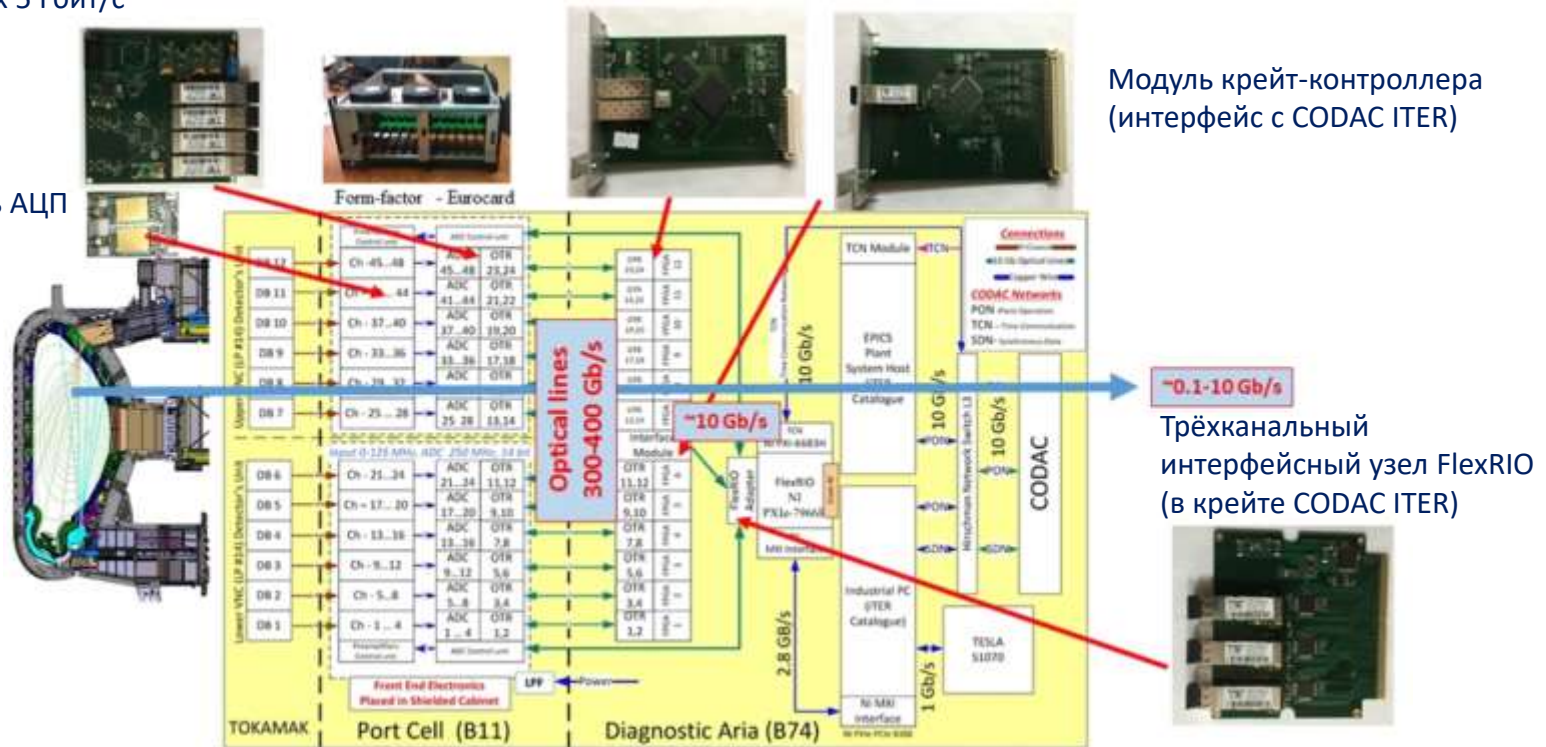
Преобразователь оптической линии передачи данных 5 Гбит/с

Выносной кейт в зоне «Port Cell»  
 Модуль сбора и потоковой обработки данных в диагностическом здании

Выносной модуль АЦП 4 канала  
 14 бит 250 МГц с развязкой 1кВ

Модуль кейт-контроллера (интерфейс с CODAC ITER)

ИТЭР

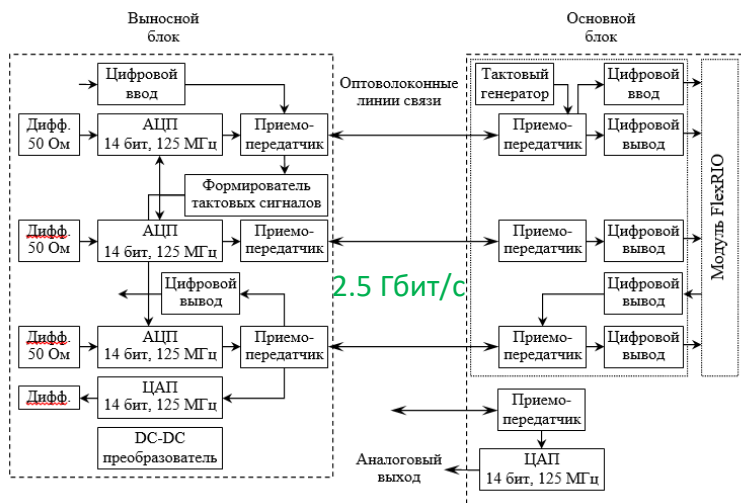


Структура системы обработки данных для ВНК ИТЭР

# IV. Разработка приборов и технологий для метрологического обеспечения исследований (3)

Разработка макета гальванической развязки с тактовой частотой 125 МГц для диверторного монитора нейтронного потока (ДМНП) ИТЭР

(контракт с ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»)



Выносной крейт в зоне «Port Cell»

Крейт диагностическом здании

Блок-схема развязки для ДМНП ИТЭР

Разработка синхронной многоканальной системы регистрации с гальванической изоляцией для ГДЛ (детекторы абсорбера плазмы) и других применений в области экспериментальной физики



- Дифф. входы с изоляцией на 1 кВ;
- 8-канальные модули;
- 20 МГц «дельта-сигма» АЦП
- Передача данных в интерфейсный узел по оптоволоконным линиям.



Разработка 64-канальной системы регистрации сигналов ЛФД для диагностики пучка в ЛИУ

# V. Заключение

## Гранты с участием лаб. 9-1 в 2017 г.

- ❖ Грант РФФИ для поддержки научных групп № 14-12-01007, «Физика электронно-циклотронного взаимодействия электромагнитного излучения с плазмой в крупномасштабной газодинамической ловушке»;
- ❖ Грант на реализацию в 2014-2018 годах комплексной научной программы: "Развитие исследовательского и технологического потенциала ИЯФ СО РАН в области физики ускорителей, физики элементарных частиц и управляемого термоядерного синтеза для науки и общества", № 14-50-00080.

## Контракты лаб. 9-1 в 2017 г.

- ❖ Договор № 17-50 с частным учреждением Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»;
- ❖ Договор № 17-160 с частным учреждением Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», выполнен в кооперации с лаб. 2.

## Основные публикации за 2017 г. (всего 11 публикаций)

- ❖ D.V. Yakovlev, A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin and P.A. Bagryansky, Electron cyclotron plasma startup in the GDT experiment. *Nucl. Fusion* **57** (2017) 016033;
- ❖ E. Soldatkina, M. Anikeev, P. Bagryansky, M. Korzhavina, V. Maximov, V. Savkin, D. Yakovlev, P. Yushmanov, and A. Dunaevsky, Influence of the magnetic field expansion on the core plasma in an axisymmetric mirror trap, *PHYSICS OF PLASMAS* **24**, 022505 (2017);
- ❖ А.А. Иванов, В.В. Приходько. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы. *УФН*, т. **187**, № 5, с. 547-574 (май 2017);
- ❖ V. Ya. Savkin and A. A. Lizunov, Note: Diagnostic deuterium beam with an ultra-small energy spread for plasma Spectroscopy, *Review of Scientific Instruments* **88**, 076109 (2017).