



# Диагностический комплекс Т-15МД

*Современное состояние и перспективы*

**А.В. Сушков**

**от имени коллектива Т-15МД**



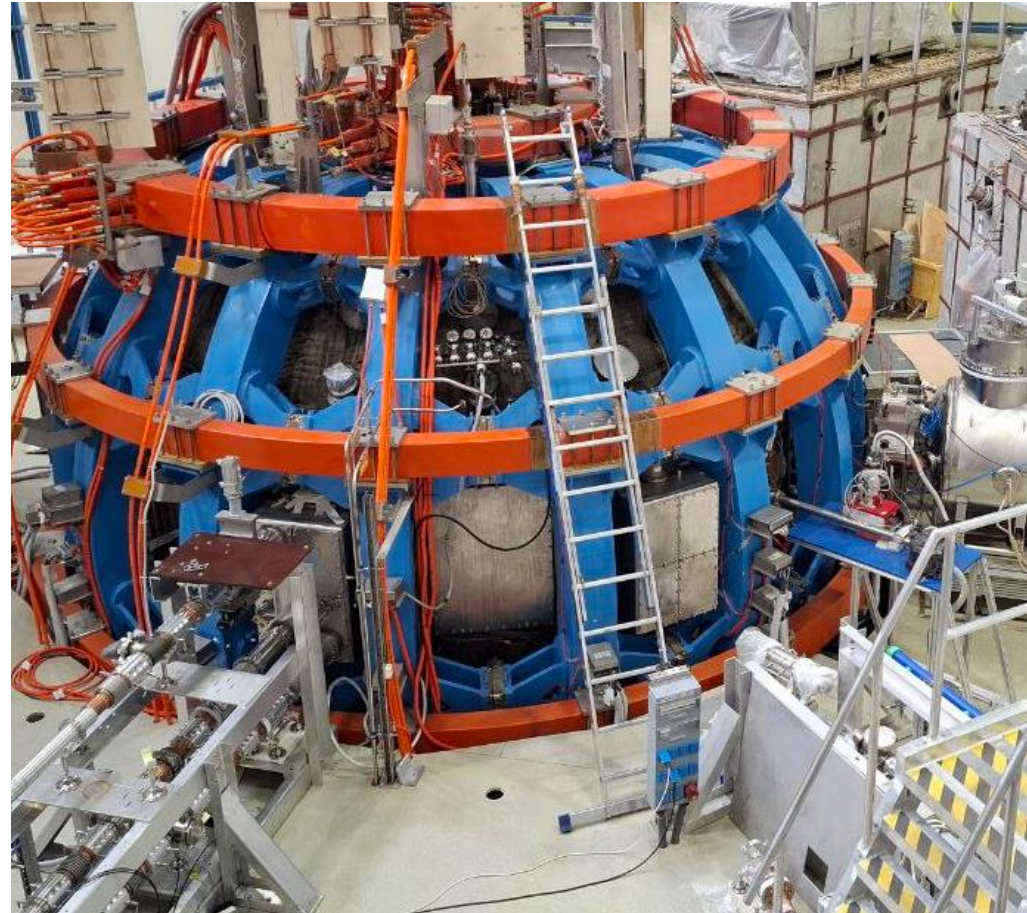
## План выступления

- Введение: токамак Т-15МД
- Основные принципы построения диагностического комплекса:
  - физические задачи и выбор роли диагностики
  - формирование требований к диагностикам
  - гармонизация развития установки и диагностического комплекса
  - текущий статус диагностического комплекса Т-15МД
- Диагностики Т-15МД:
  - диагностики в рутинной эксплуатации
  - ближайшие планы
  - долгосрочные планы
- Заключение



## Основные параметры Т-15МД

| Параметр                                      | Проект | 2025 |
|---|--------|------|
| Большой радиус R, м                           | 1.48   | 1.5  |
| Аспектное отношение A                         | 2.2    | 2.2  |
| Вытянутость, $k_{95}$                         | 1.8    | 1.7  |
| Троидальное поле $B_t$ , Т                    | 2      | 1.5  |
| Ток плазмы $I_p$ , МА                         | 2      | 0.6  |
| Длительность импульса $B_t=1(2)$ Т, с         | 30(10) | 3    |
| Концентрация плазмы, $10^{20} \text{ m}^{-3}$ | 1      | 0.15 |
| Рабочий газ                                   | H, He  | H    |
| Дополнительный нагрев, МВт:                   |        |      |
| - ECRH and CD                                 | 8      | 1    |
| - NBI   | 6      |      |
| - LHCD  | 4      |      |
| - ICRH  | 6      |      |





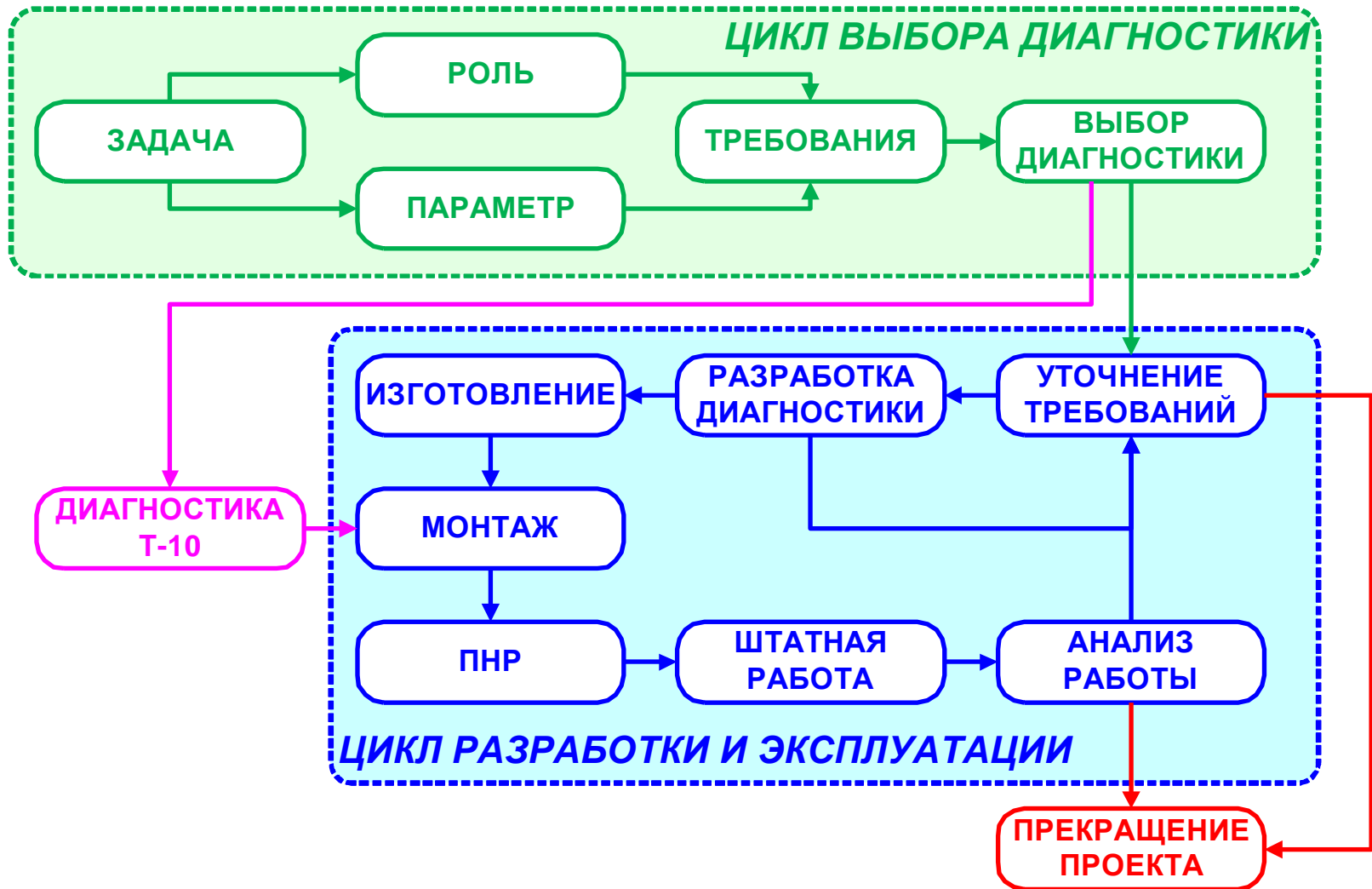
## Основные принципы построения диагностического комплекса

- При построении диагностического комплекса установки первостепенное значение имеет решение физической задачи, а не разработка конкретной диагностики
- Физическая задача определяет роль и требования к измеряемому параметру
- Исходя из требований к измеряемому параметру выбирается конкретная диагностика для его измерения и ее характеристики
- Приоритетность разработки и ввода в строй диагностик определяется их ролью в составе комплекса и актуальностью диагностики для данного этапа жизненного цикла установки



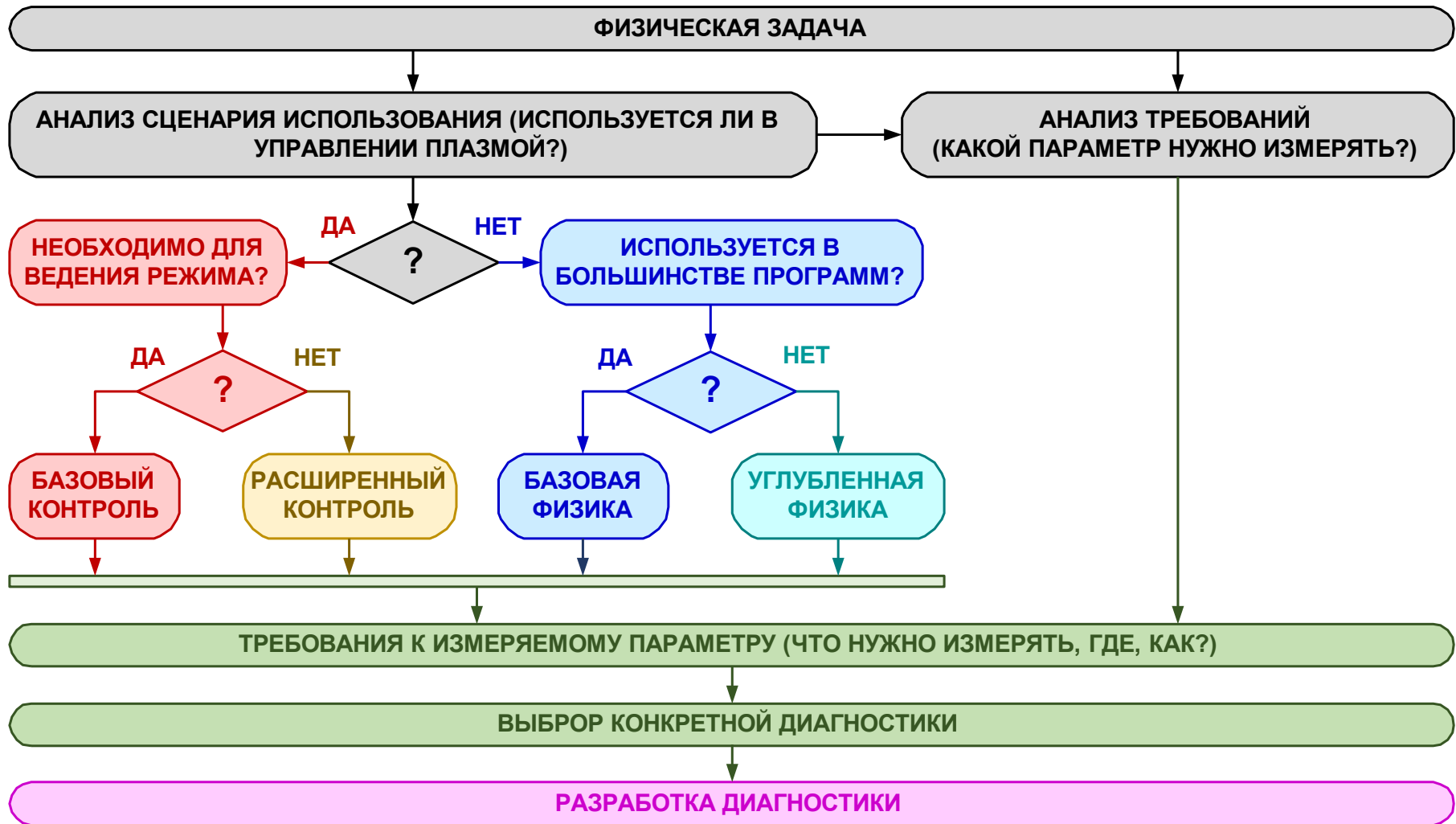
# ЦИКЛ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ

ДИАГНОСТИКА РАЗРАБАТЫВАЕТСЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОНКРЕТНОЙ ЗАДАЧИ





## РОЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ РЕШАЕМОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕЙ





## РОЛЬ ОПРЕДЕЛЯЕТ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ДИАГНОСТИКЕ

### Базовое управление

- обеспечение получения и управления плазменным разрядом
- стабильная работа и отказоустойчивость во всех сценариях разряда
- интегральные измерения с временным разрешением ~ 1 мс
- работа в режиме реального времени
- интегрируемость в систему управления установкой

### Расширенное (кинетическое) управление

- управление отдельными параметрами плазмы в определенной области шнура
- работа в режиме реального времени

### Базовая физика

- измерения основных параметров плазмы для широкого спектра физических программ
- устойчивая работа в большинстве сценариев разряда
- умеренное пространственное разрешение (~ 3 см)
- умеренное временное разрешение (~ 30 мкс)
- работа в режиме квазиреального времени (до 10 минут на восстановление данных в импульсе)

### Углубленная физика

- измерения параметров плазмы для конкретных физических измерений
- высокое пространственное разрешение ( $\lesssim 1$  см)
- высокое временное разрешение ( $\lesssim 1$  мкс)
- специфические параметры (флуктуации, скорость плазмы, надтепловая компонента, пр.)



ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОНКРЕТНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ УТОЧНЯЮТСЯ ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРЯЕМЫМ ПАРАМЕТРАМ: ВРЕМЕННОЕ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, ДИАПАЗОН ПАРАМЕТРОВ

### Область измерений

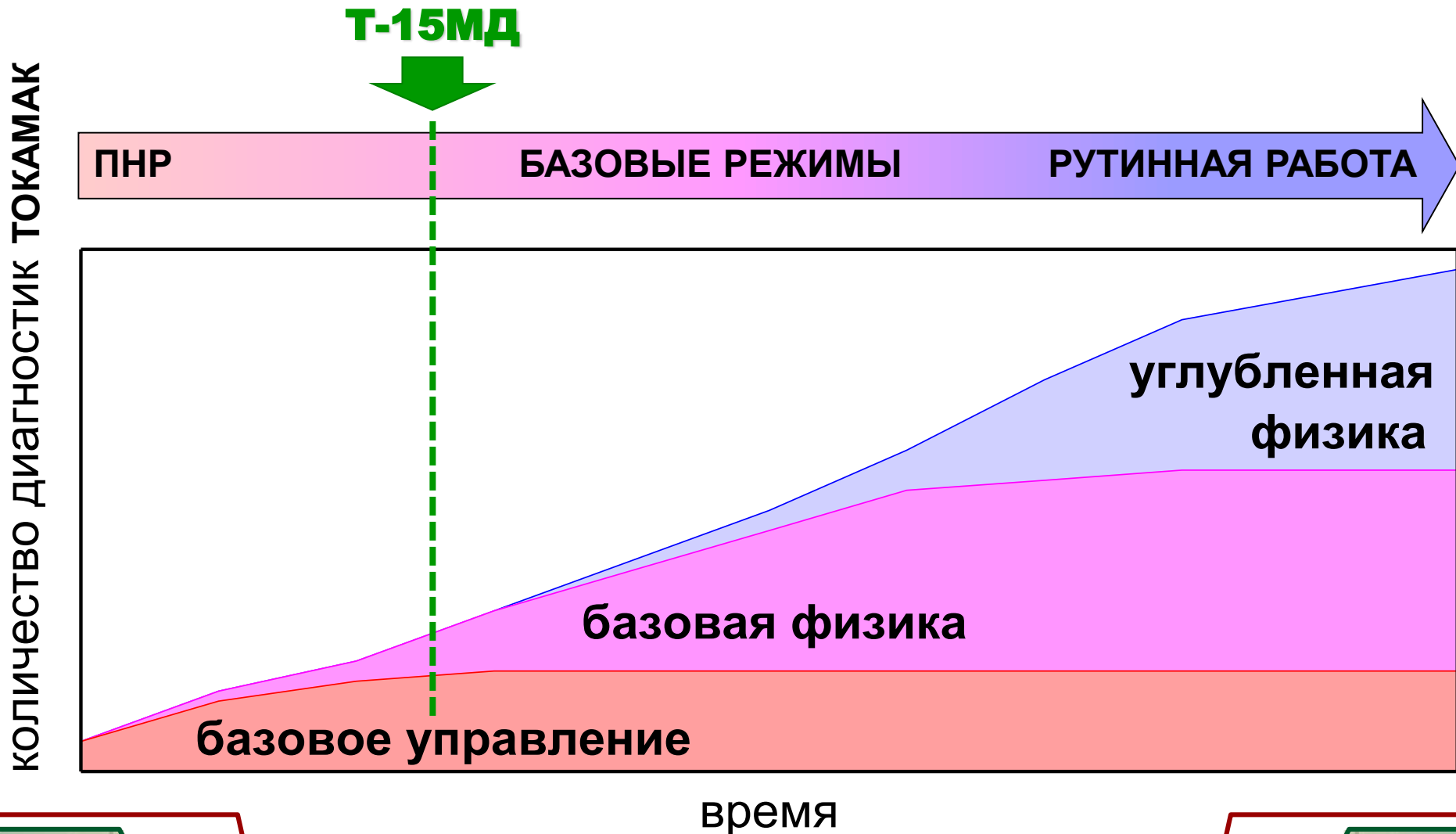
- основная плазма (core)  $\Rightarrow T_{e,i} \gtrsim 100 \text{ эВ}, n_e \gtrsim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , разрешение  $a/30$
- периферийная плазмы (edge)  $\Rightarrow 10 \text{ эВ} \lesssim T_{e,i} \lesssim 100 \text{ эВ}, 10^{18} \text{ м}^{-3} \lesssim n_e \lesssim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , разрешение  $\sim 1 \text{ см}$
- область незамкнутых поверхностей (SOL)  $\Rightarrow T_{e,i} \lesssim 10 \text{ эВ}, n_e \lesssim 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , разрешение  $\sim 1 \text{ см}$
- диверторная область  $\Rightarrow T_{e,i} \lesssim 100 \text{ эВ}, 10^{18} \text{ м}^{-3} \lesssim n_e \lesssim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , разрешение  $\sim 1 \text{ см}$
- типичное временное разрешение – 1 мс

### Физическая задача

- исследование быстрых процессов  $\Rightarrow$  временное разрешение  $\sim 1 \text{ мкс}$
- формирование транспортных барьеров  $\Rightarrow$  пространственное разрешение  $\sim 1 \text{ см}$
- физика аномального переноса  $\Rightarrow$  параметры флуктуаций плотности / температуры / пр.
- МГД, тиринг и альфвеновские моды  $\Rightarrow$  измерение амплитуды, частоты и номера моды
- процессы в диверторе  $\Rightarrow$  измерение амплитуды, частоты и номера моды
- взаимодействие плазма – стенка  $\Rightarrow$  температура поверхности, осаждение материалов / пр.

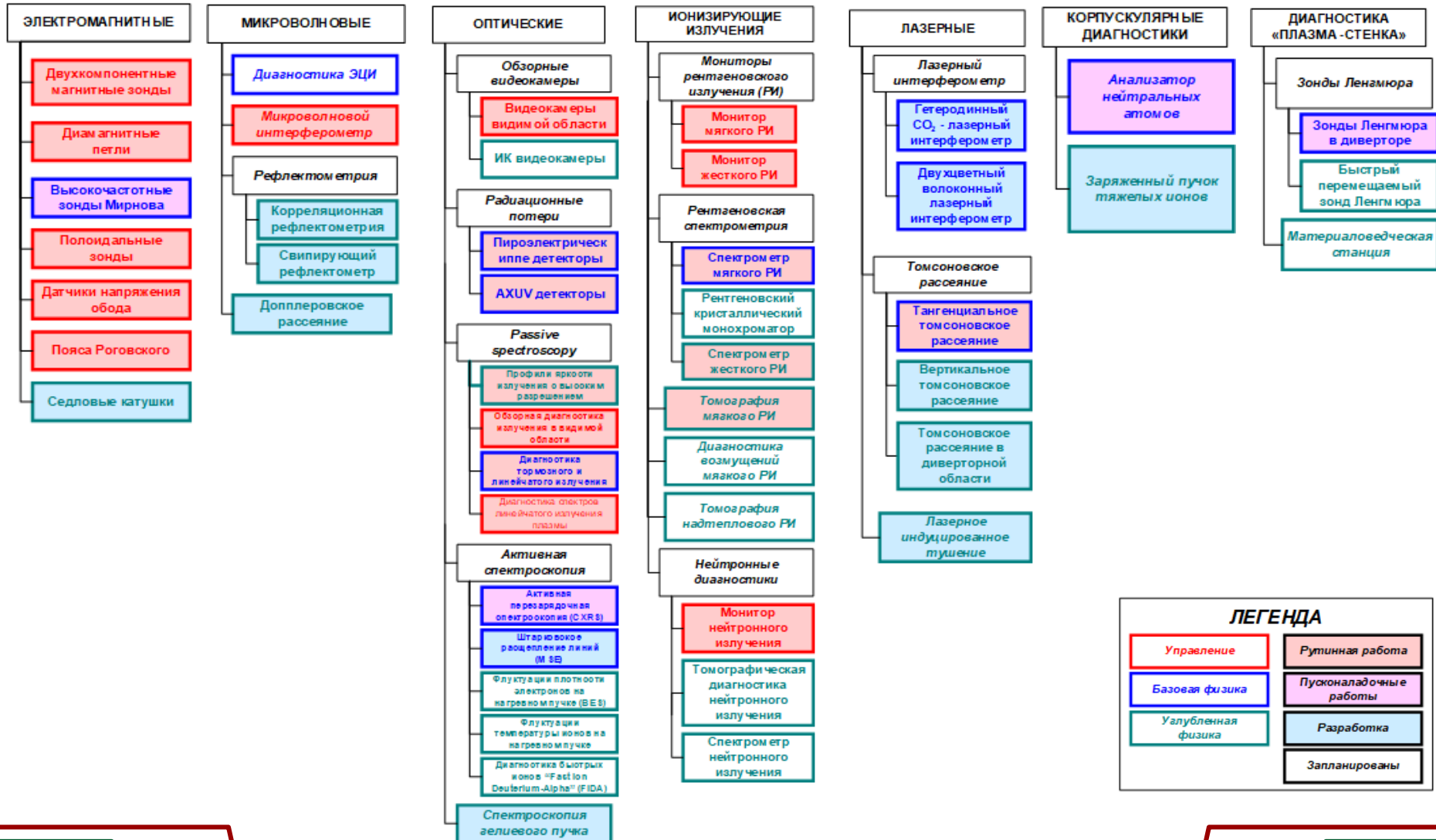


ВВОД В СТРОЙ ДИАГНОСТИК ДОЛЖЕН БЫТЬ ГАРМОНИЗИРОВАН С ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ УСТАНОВКИ





## ДИАГНОСТИКИ НАХОДЯТСЯ НА РАЗНОЙ СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА



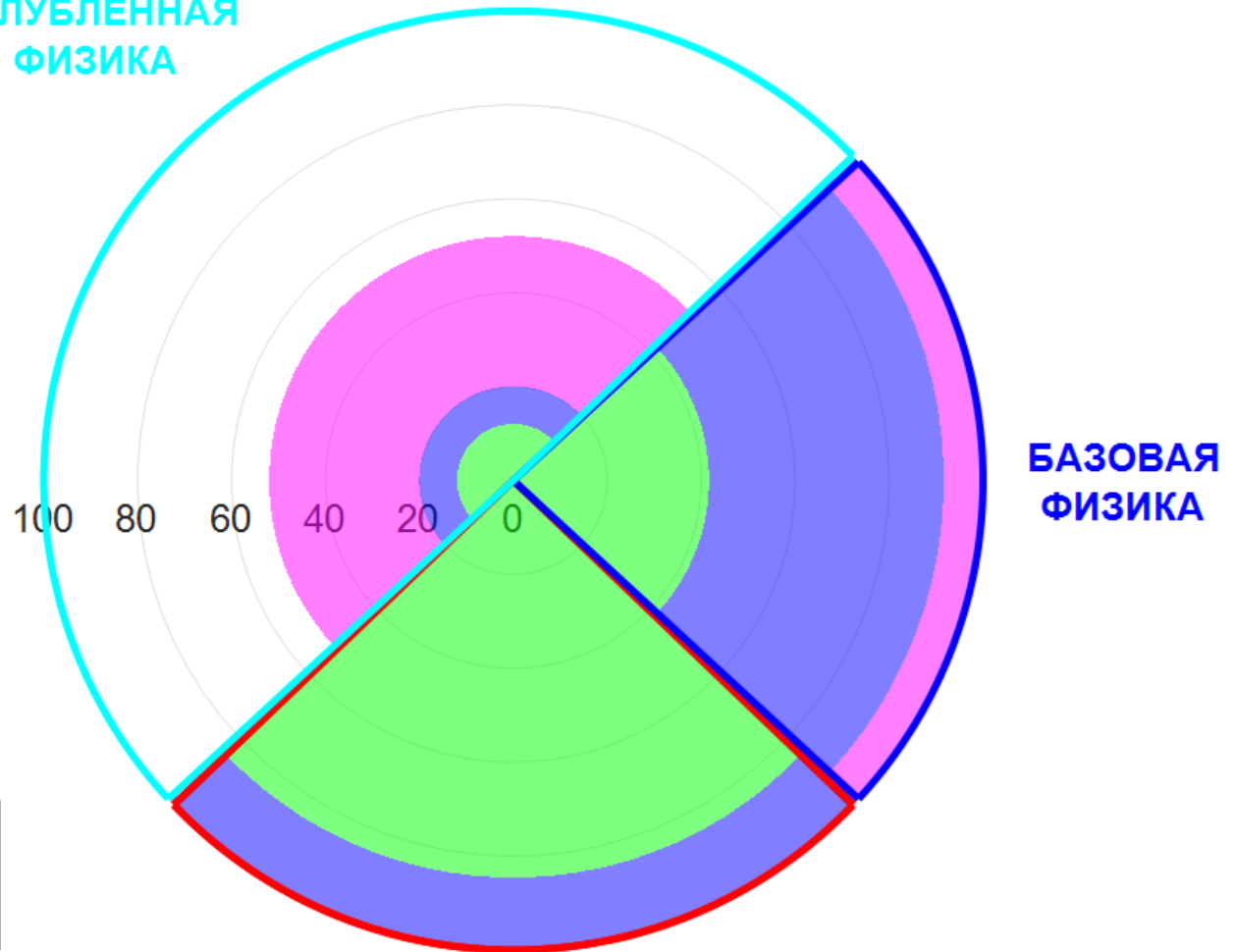
**ЛЕГЕНДА**

|                    |                        |
|--------------------|------------------------|
| Управление         | Рутинная работа        |
| Базовая физика     | Пусконаладочные работы |
| Углубленная физика | Разработка             |
|                    | Запланированы          |



## РУТИННАЯ РАБОТА ДИАГНОСТИК УПРАВЛЕНИЯ, ПНР ДИАГНОСТИК БАЗОВОЙ ФИЗИКИ

УГЛУБЛЕННАЯ  
ФИЗИКА



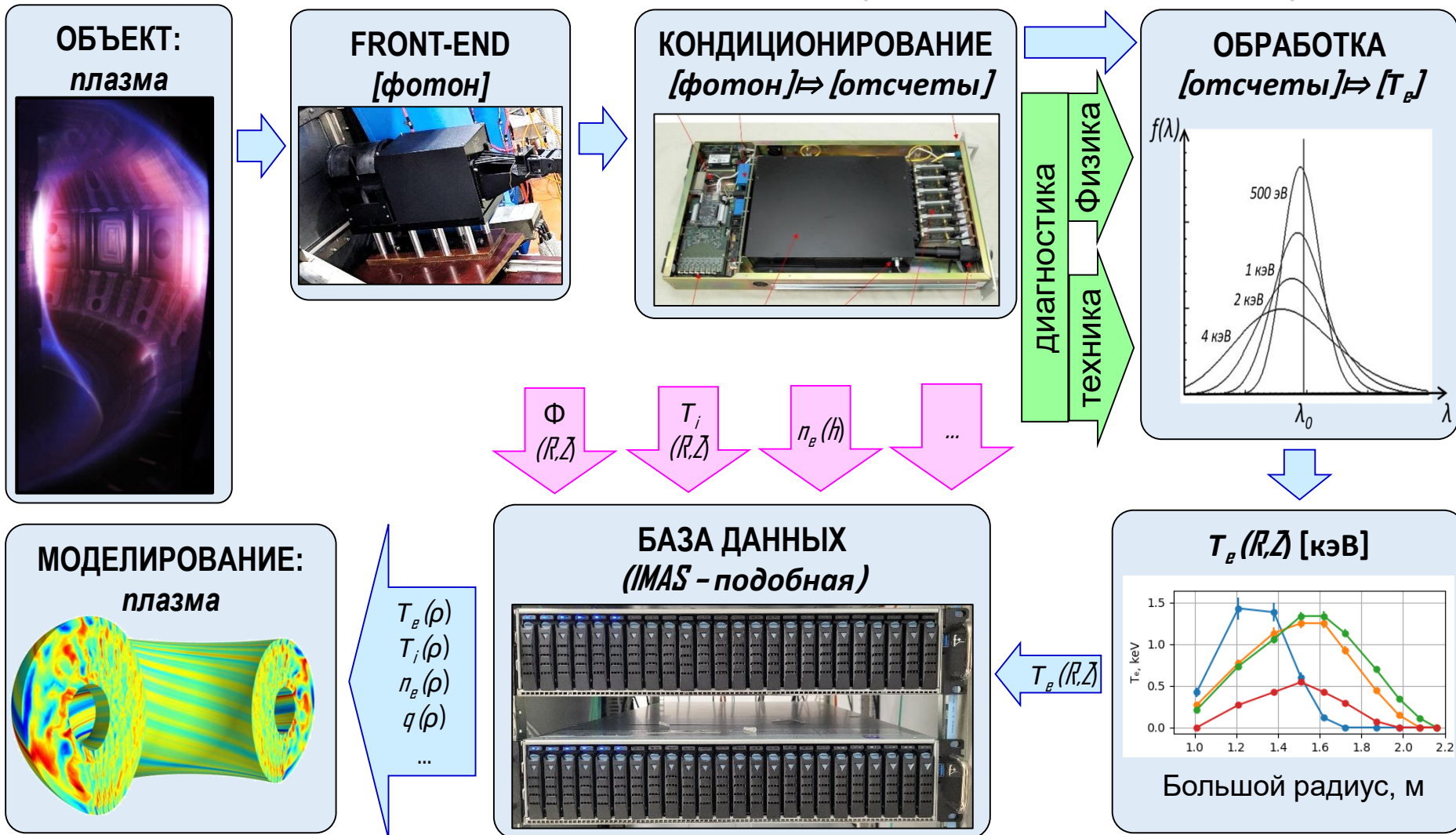
БАЗОВАЯ  
ФИЗИКА

УПРАВЛЕНИЕ

- рутинная работа
- пусконаладочные работы
- разработка



## ДИАГНОСТИКА КАК МОСТ ОТ ПЛАЗМЫ К ФИЗИКЕ (ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ)

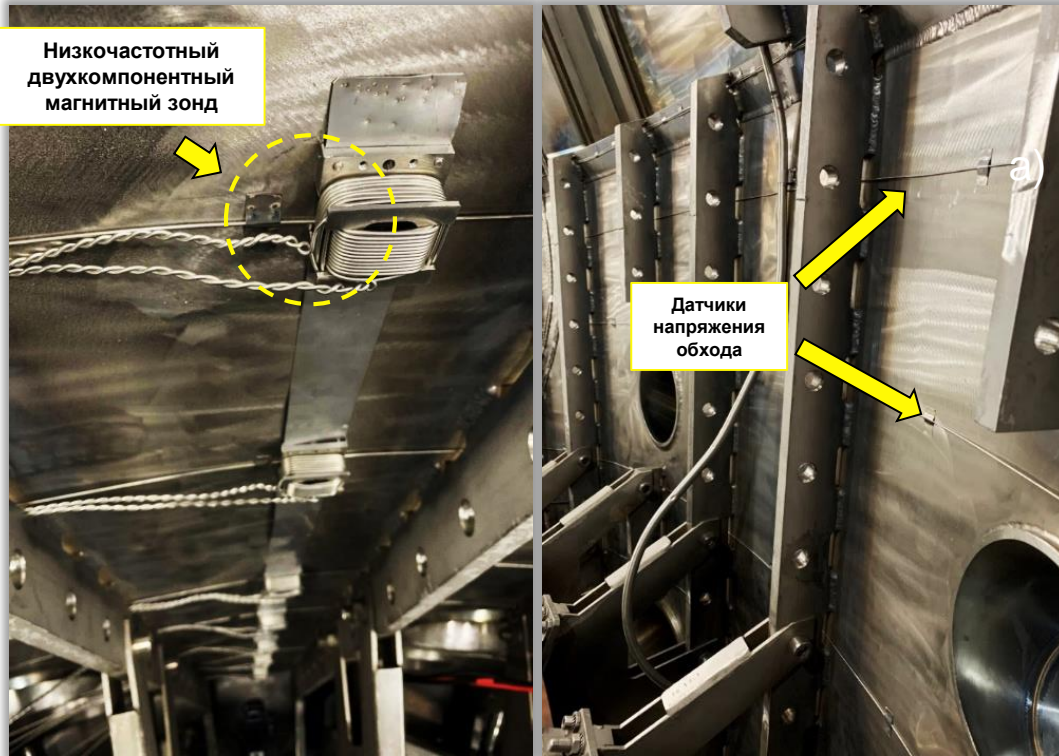




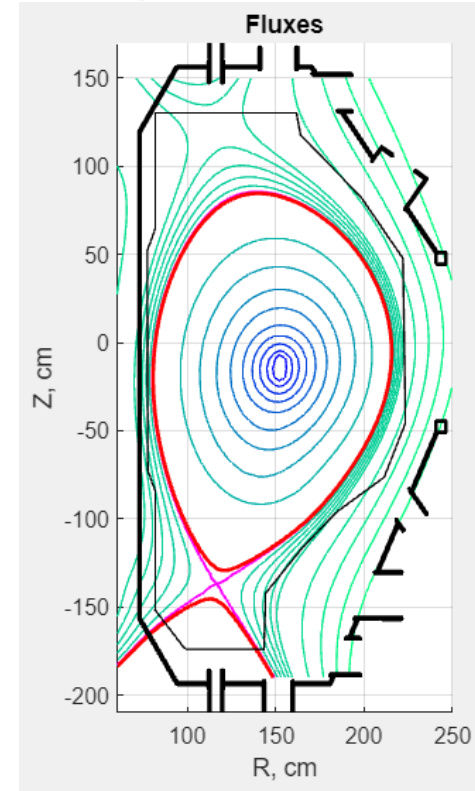
## **Диагностики введенный в строй и работающие в режиме рутинной эксплуатации**



## Датчики внутри вакуумной камеры (ВК)



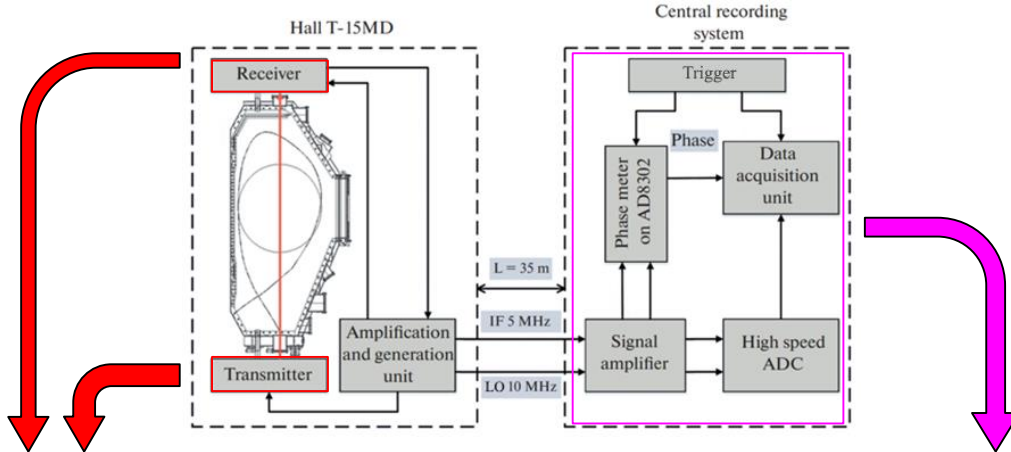
## Восстановления равновесия кодом D\_Bound



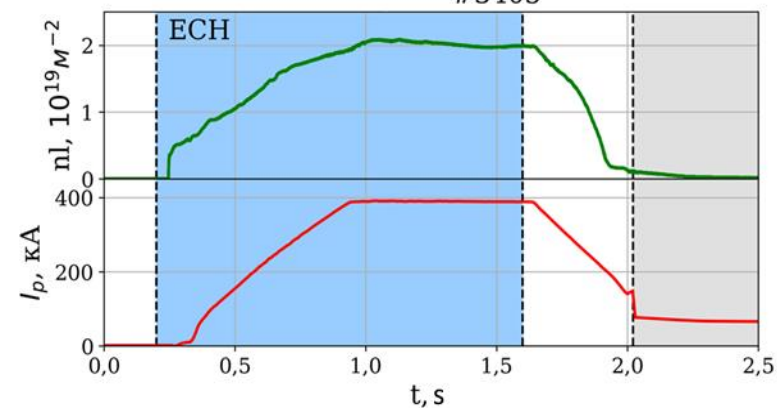
- В составе: пояса Роговского - 2 внутри ВК, 2 снаружи ВК, 2 на витках пассивной стабилизации; датчики напряжения обхода - 32; НЧ магнитные зонды (тангенциальная и нормальная компонента) - 39;
- Частота регистрации 100 кГц, цифровое интегрирование в реальном времени
- **Основная задача: работа в составе системе управления плазменный разрядом (ток плазмы, положение плазменного шнура)**



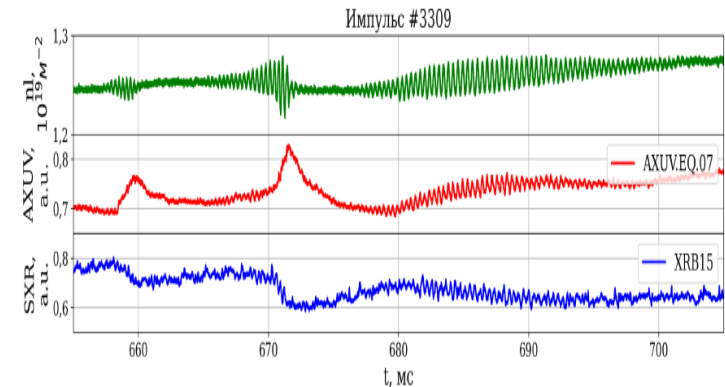
## Блок схема диагностики



## Осциллограмма хордовой плотности #3405



## МГД возмущения на сигнале плотности



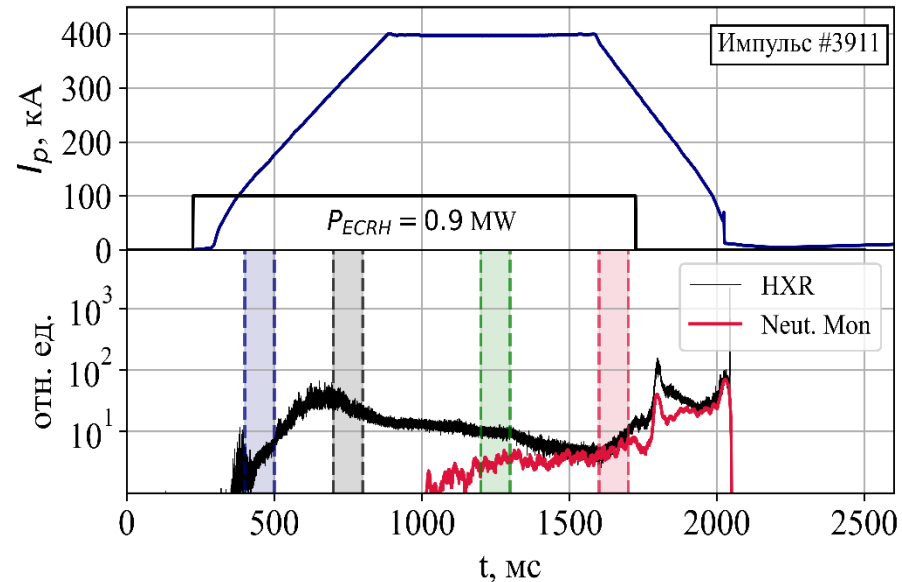
- Вертикальное зондирование через центр вакуумной камеры
- Длина волны  $\lambda = 936 \mu\text{m}$ , промежуточная частота (IF)  $f_{IF} = 5 \text{ MHz}$
- Временное разрешение:  $2 / 0.2 \mu\text{s}$  (реальное время / после разряда), точность  $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$
- **Основная задача: контроль средней плотности в реальном времени**



## Мониторы ионизирующего излучения на Т-15МД Осциллограммы сигналов мониторов HXR и нейтр.



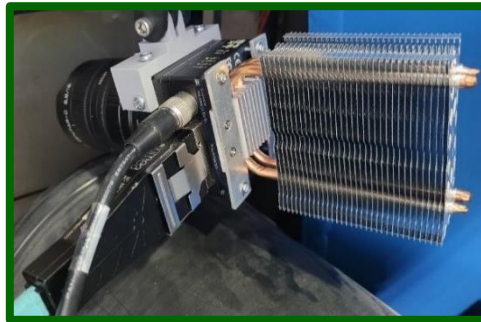
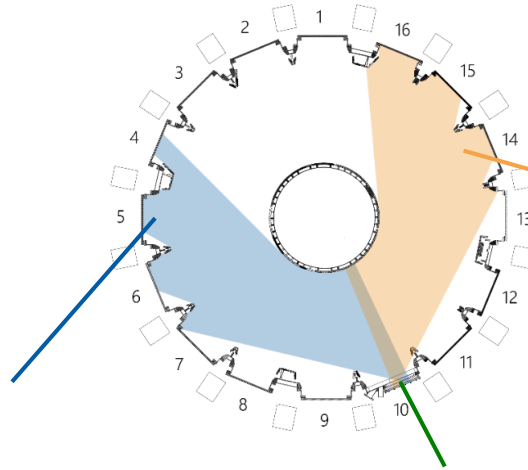
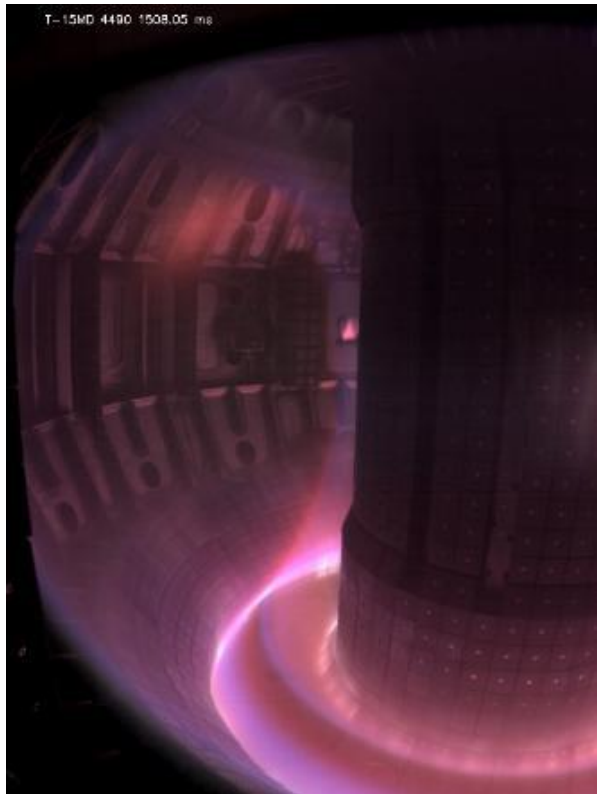
- a – SXR монитор 2 - 20 keV
- b – NXR монитор 15 - 300 keV
- c – HXR монитор 0.3 -10 MeV
- d – нейтронный монитор



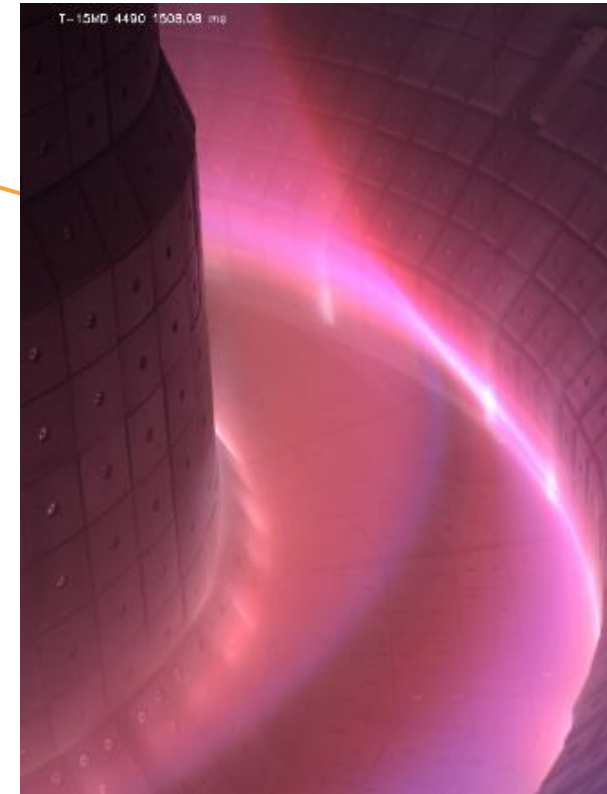
- Энергетический диапазон измерений рентгеновского излучения : 0.002 – 10 MeV
- Энергетический диапазон измерений нейтронного излучения: 1 – 2.5 MeV
- Временное разрешение: 10  $\mu\text{s}$
- **Основная задача: мониторинг формирования пучка ускоренных электронов**



## Обзорная камера



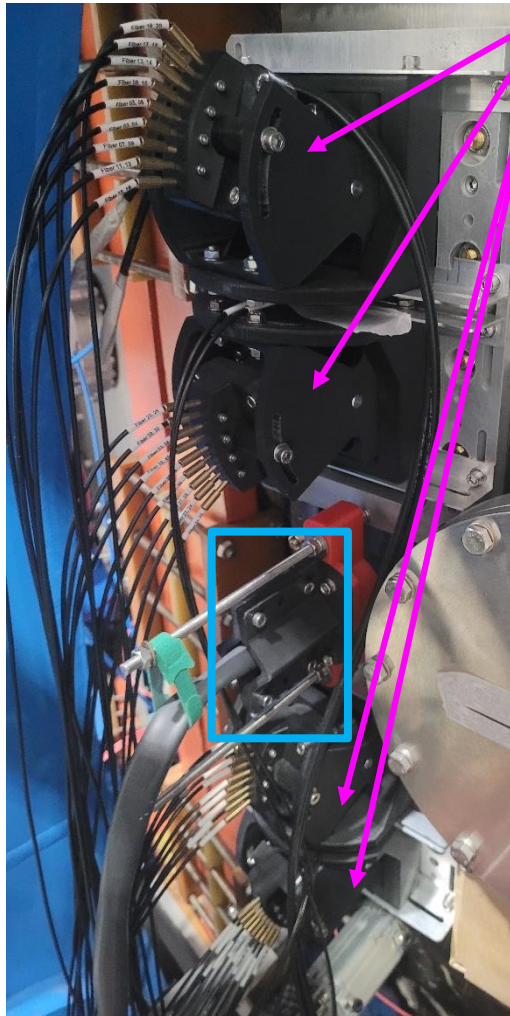
## Диверторная область



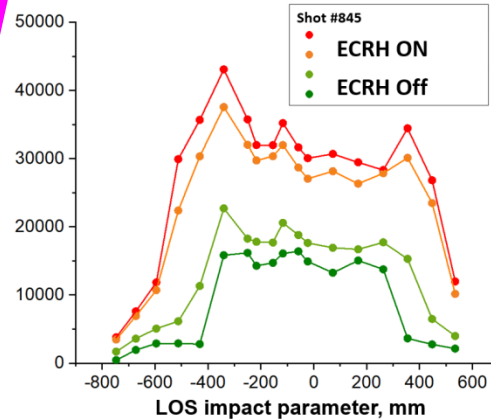
- Две цветных CCD камеры (12 bit, 2048 x 1536 pix) с частотой 500 кадров в секунду
- Основные задачи: мониторинг разрядов, контроль положение шнура, верификация равновесия (в том числе X-точки, усов сепаратрисы, ударных точек)



## Размещение диагностики

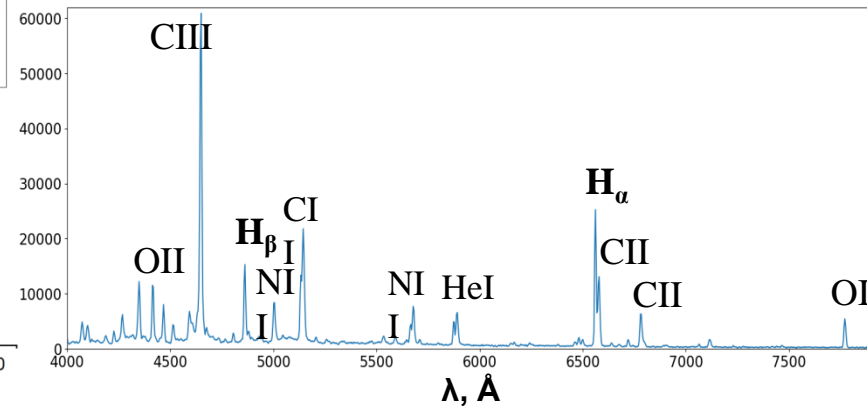


36 линий наблюдения  
профили излучения CVI  
и тормозного континуума



## Обзорный спектрометр 300 – 800 nm

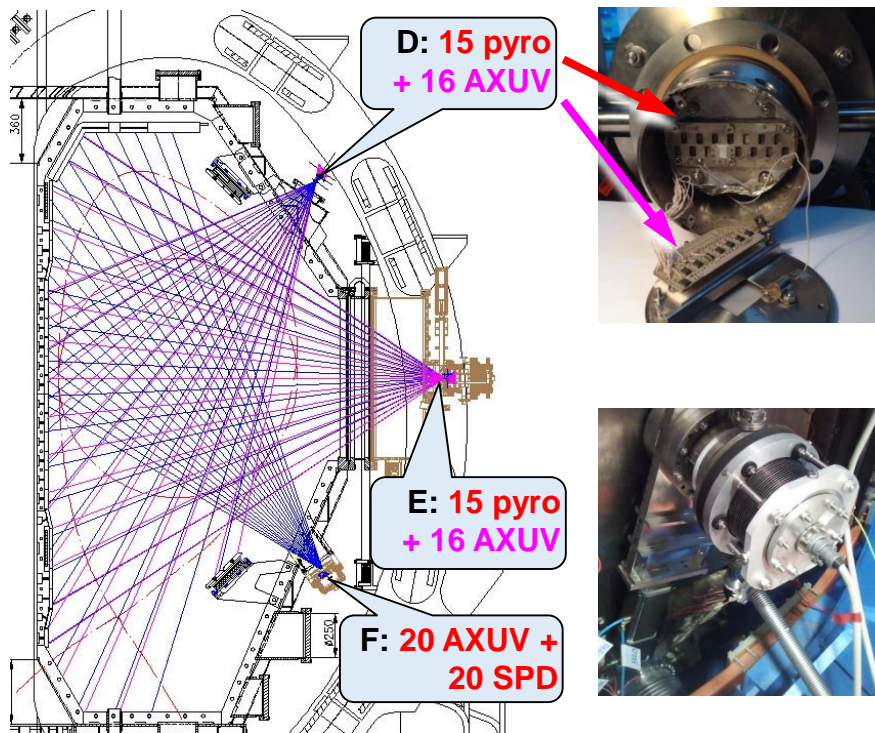
Спектр в видимой области разряд #881



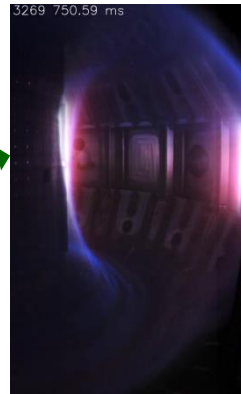
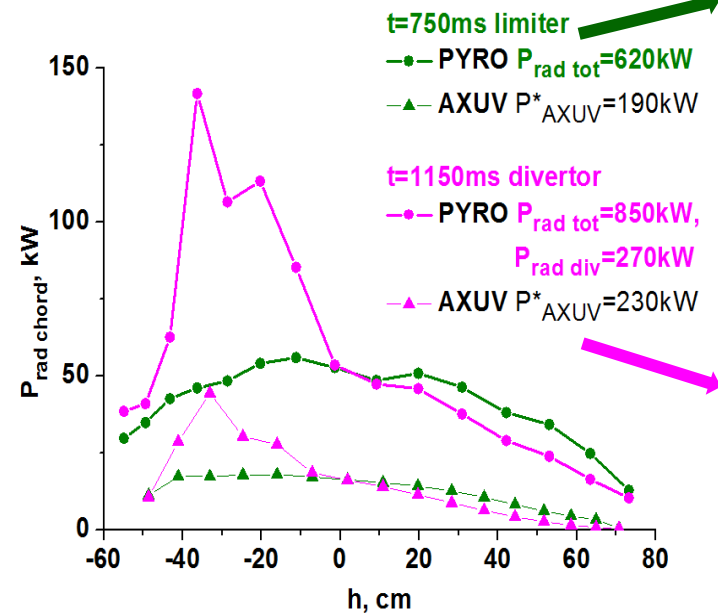
- Быстрая система регистрации характерных линий на MDR-2 монохр. и ФЭУ (Осциллограммы интенсивности линий  $H_{\beta}$ , CIII, CVI, NII, OII, HeI)
- Диагностики среднего спектрального разрешения ( $1 \text{ \AA}$ ) на MDR-23 и CCD Pixis 1300B для измерения выбранных линий примесей
- Многоканальная система высокого разрешения (до  $0.2 \text{ \AA}$ ) на HES-370 и EMCCDs PhotonMax 512B ( $Z_{\text{eff}}(r)$  и периферийные профили  $T_e(r)$ )
- Обзорный спектрометр в видимой области (300 – 800 nm) B&W Tek Exemplar LS (измерение состава примесей плазмы)
- **Основная задача: оперативный контроль компонентного состава плазмы в разряде**



## Три ракурса наблюдения



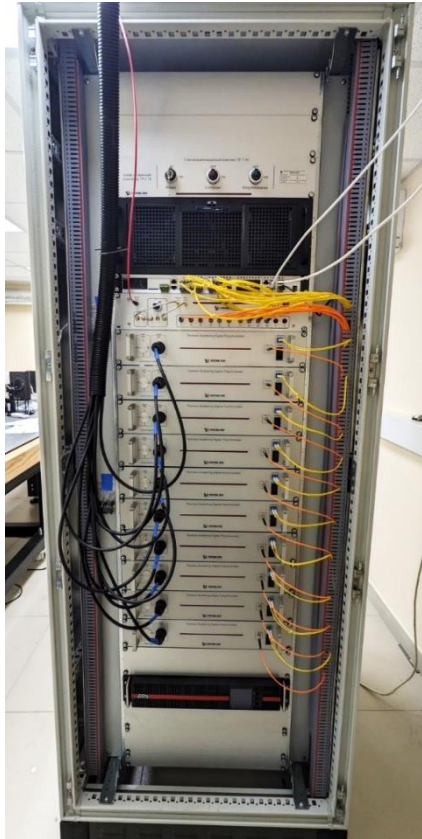
## Разряд 3629, $P_{rad}$ хордовые профили, ракурс D для лимитерной и диверторной плазмы



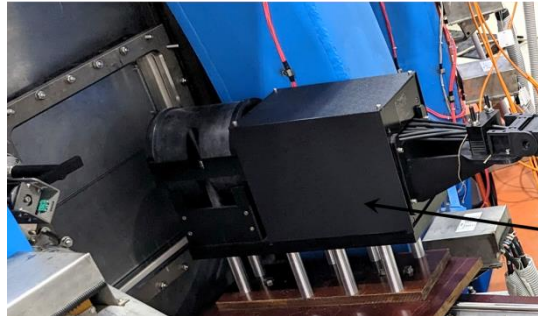
- Пирозлектрические детекторы – абсолютные измерения радиационных потерь (от ИК до Рентг.), временное разрешение  $\sim 10$  ms, NEPD $\sim 10$  mW/cm<sup>2</sup>.
- Фотодиоды AXUV & SPD – измерения быстрых/мелкомасштабных явлений в основном в ВУФ-диапазоне, временное разрешение  $\sim 2$   $\mu$ s, NEPD $\sim 10$  nW/cm<sup>2</sup>
- **Основная задача: контроль потерь энергии с излучением**



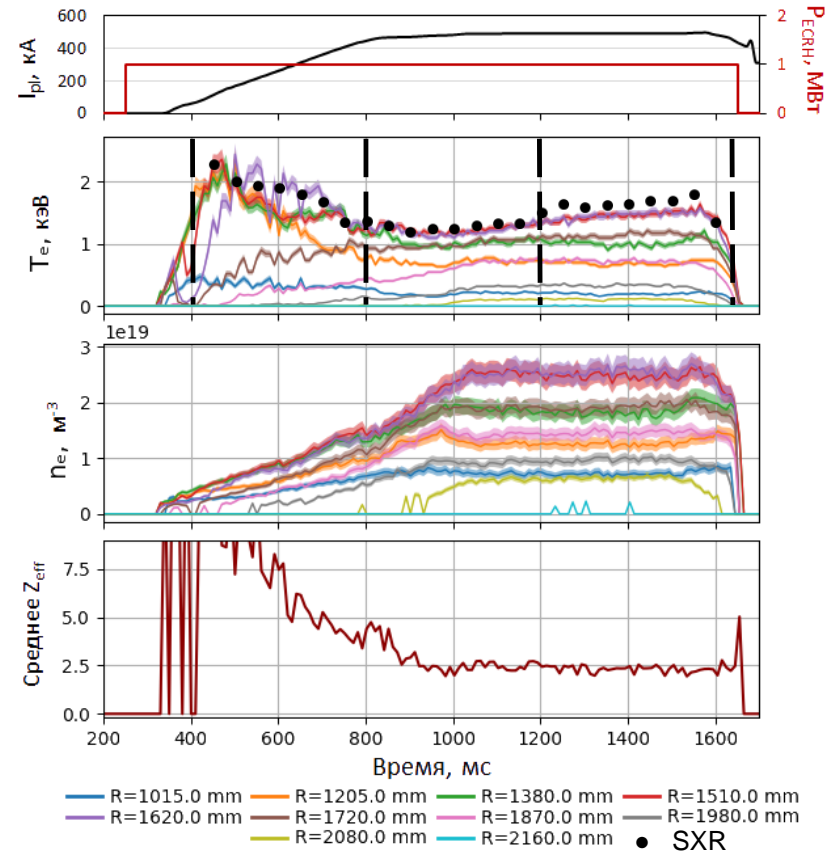
## Стойка полихроматора



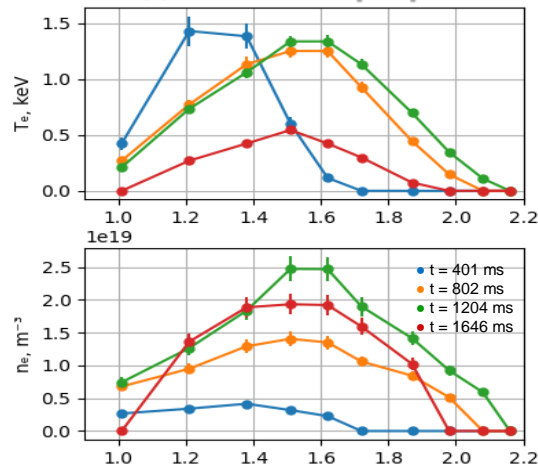
## Устройство сбора света



## Данные диагностики для импульса #3461



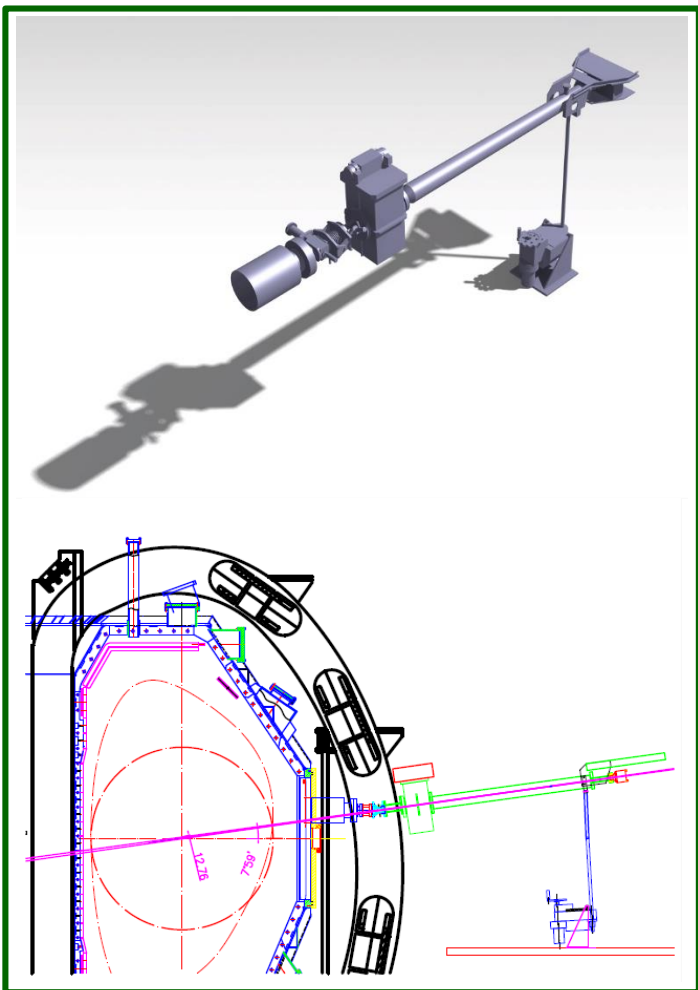
## Радиальные профили



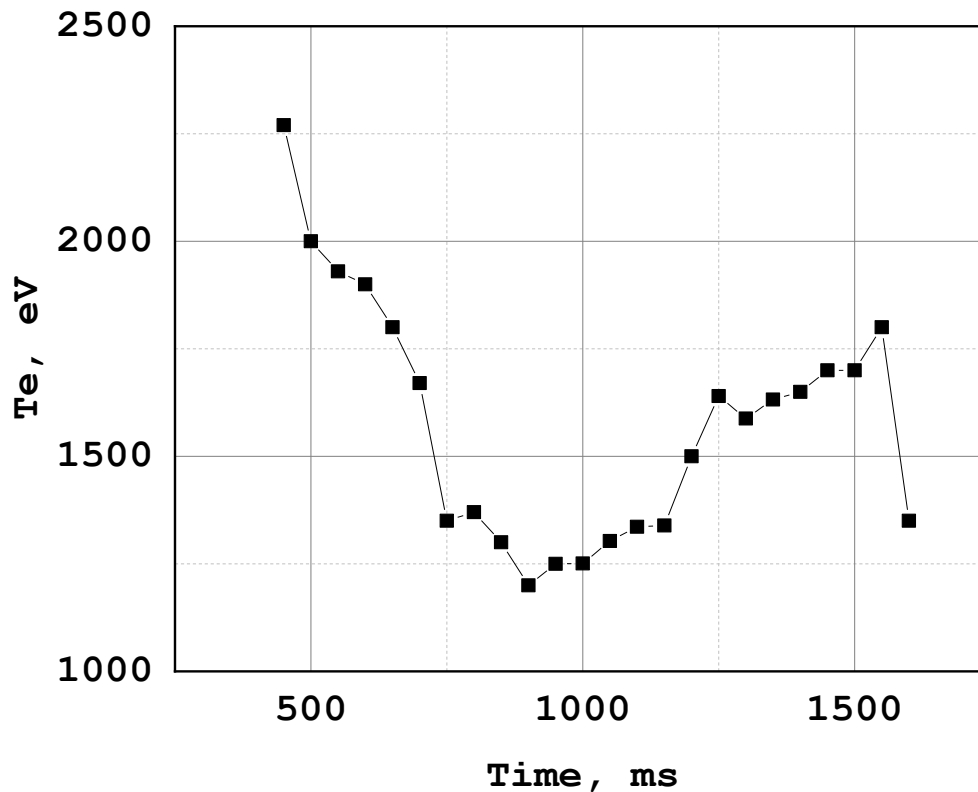
- 10 пространственных точек в экваториальной плоскости, временное разрешение 10 ms
- Диапазон измерений:  $T_e \geq 40 \text{ eV} / n_e \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$
- В настоящее время тестируется возможность оценки  $Z_{eff}$
- Основная задача: базовые измерения профилей электронной температуры и плотности



## 3D модель диагностики и размещение на установке



Shot 3461, time evolution of  $T_e$



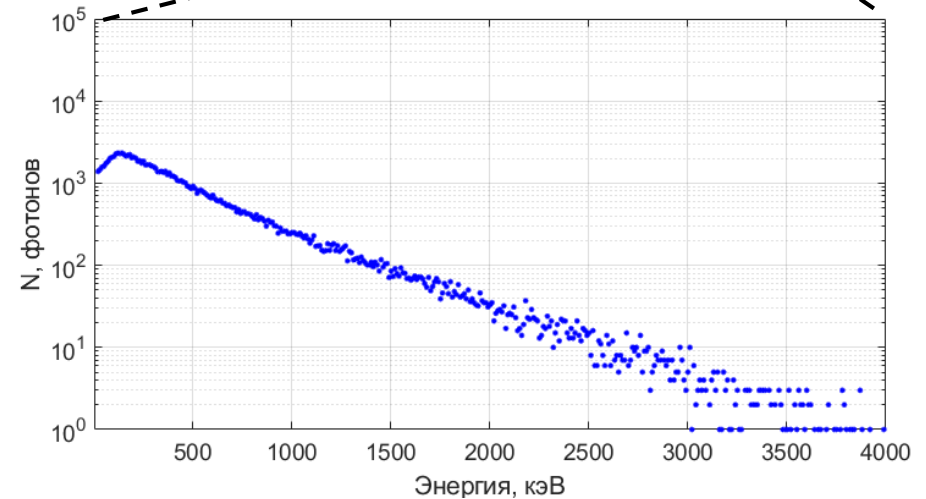
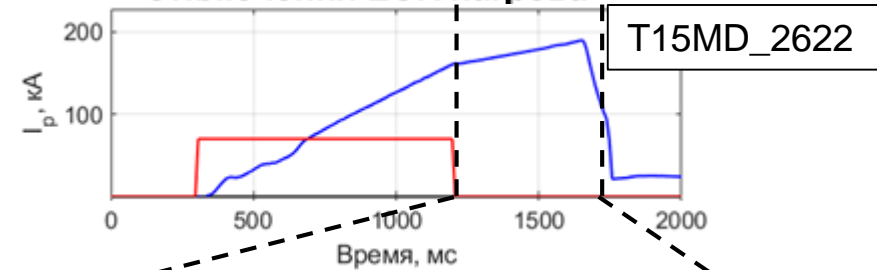
- Абсолютные измерения  $T_e$  диапазон: 0.3 to 3 keV,
- Разрешение: пространственное < 20 mm, временное ~ 50 ms.
- FPGA обработка сигнала в реальном времени
- **Основная задача: абсолютные измерения электронной температуры**



## HXR коллиматор с LaBr<sub>3</sub>(Ce) детекторами



## HXR спектр в омической фазе разряда после отключения ECR нагрева



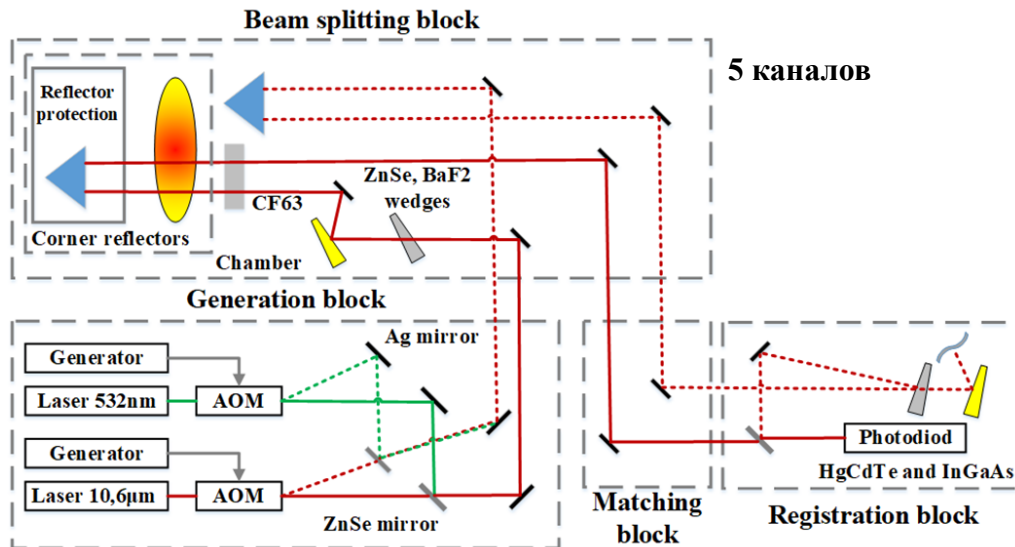
- Энергетический диапазон: 30 – 5000 keV
- Пространственное разрешение на 6 м:  $\approx 0.2$  м
- Временное разрешение:  $\approx 3$   $\mu$ s
- **Основная задача: изучение параметров пучков ускоренных электронов**



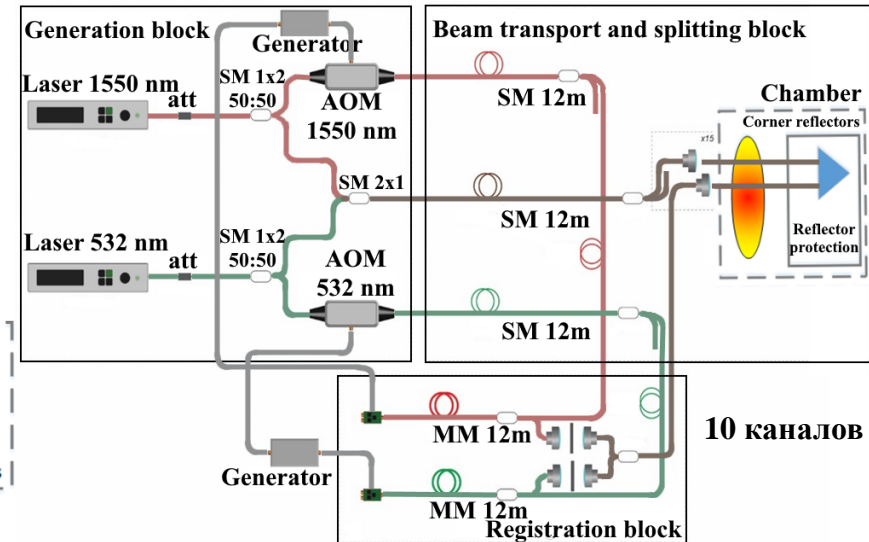
## **Диагностики в процессе ввода в эксплуатацию**



## Блок диаграмма двухцветного гетеродинного CO<sub>2</sub> лазерного интерферометра



## Блок диаграмма двухцветного гетеродинного оптоволоконного лазерного интерферометра



- Длины волн  $\lambda_1 = 10,6 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ ;
- Промежуточная частота (IF)  $f_{IF1} = 40 \text{ MHz}$ ,  $f_{IF2} = 100 \text{ MHz}$ ;
- Временное разрешение  $0,25 \text{ ms}$ ;
- Точность измерения:  $7 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ .

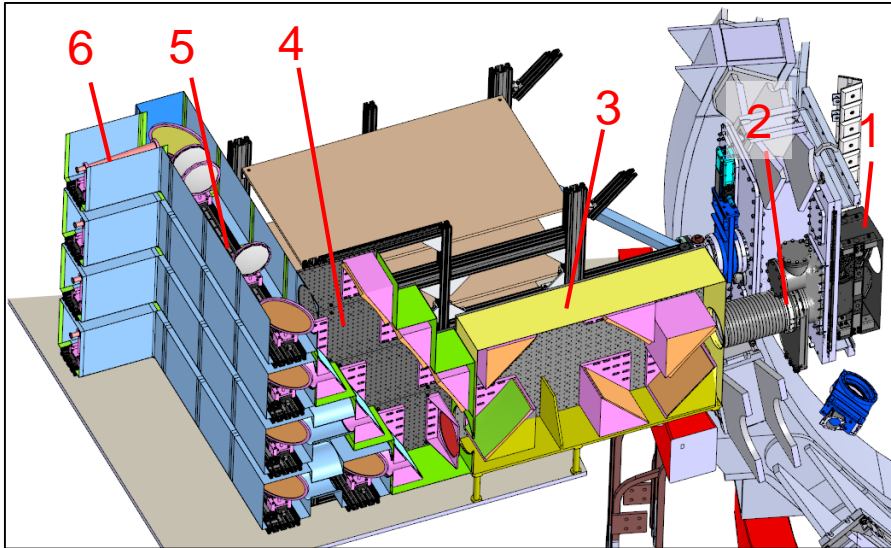
- Длины волн  $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ ;
- Промежуточная частота (IF)  $f_{IF1} = 80 \text{ MHz}$ ,  $f_{IF2} = 100 \text{ MHz}$ ;
- Временное разрешение  $0,5 \text{ ms}$ ;
- Точность измерения:  $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ .

- **Основная задача: измерения профиля электронной плотности**



## CAD модель квазиоптической фокусирующей системы

1 – Модуль вакуумных зеркал, 2 – Вакуумное окно, 3 – Передающий телескоп, 4 – Частотно-селективный демультиплексор, 5 – Система линз, 6 – Рупорная антенна



## 32-канальный радиометр W-диапазона

1a, 1b – 16-ч. Анализатор спектра, 3 – Понижающий преобразователь частоты, 4 – Блок питания



- Многоканальный гетеродинный радиометр для измерения профиля и флуктуаций  $T_e$  @ X2
- Частотные диапазоны: 40.0-75.0 GHz (LFS, 64 кан.), 74.6-95.8 GHz (HFS, 32 кан.)
- Пространственное разрешение:  $\Delta R/a \sim 0.01-0.04$ , beam  $1/e^2$  radius:  $w/a \sim 0.025-0.05$  @  $B_{t0} \sim 1.0-1.3$  T
- В будущем планируется расширение до  $\sim 140$  GHz (96 кан.) для  $B_{t0} \sim 1.3-2.0$  T
- **Основная задача: измерение измерения профиля и флуктуаций  $T_e$  @ X2**

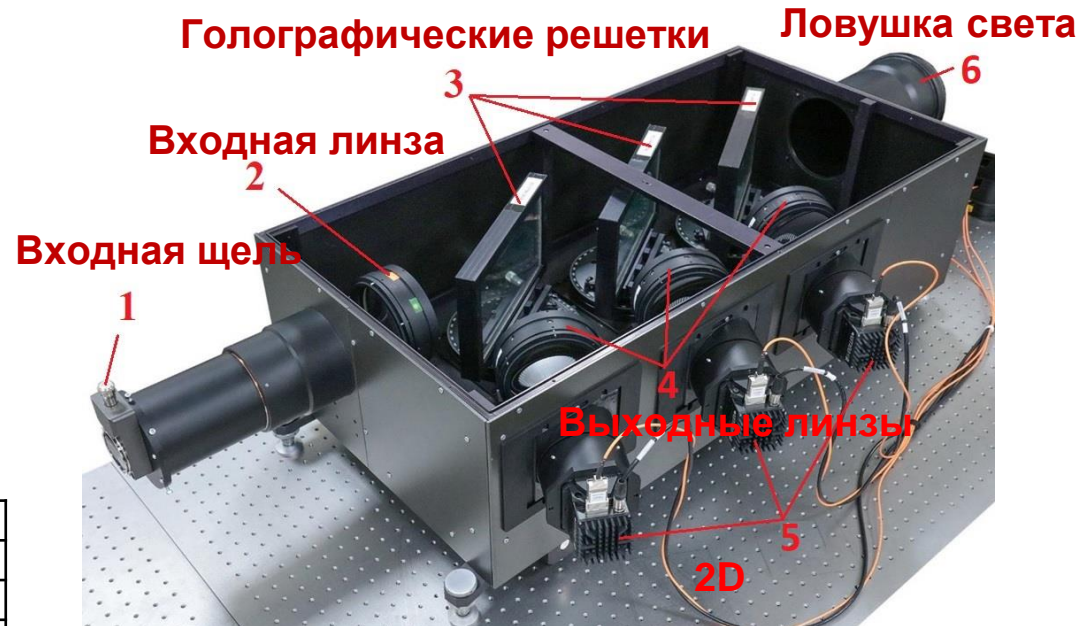


## Диагн. пучок нейтральных атомов «DINA-KI60»



|                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| Энергия основной компоненты, keV      | 60            |
| Ток пучка, А (основная компонента)    | $2,0 \pm 0,2$ |
| Дивергенция пучка, deg                | 0,6           |
| Полуширина, см                        | 6,0           |
| Фокусное расстояние, м                | $4,0 \pm 0,5$ |
| Максимальная длительность инжекции, s | 1             |
| Минимальная длительность импульса, ms | 5             |

## 3-х диапазонный ITER-like спектрометр высокого разрешения

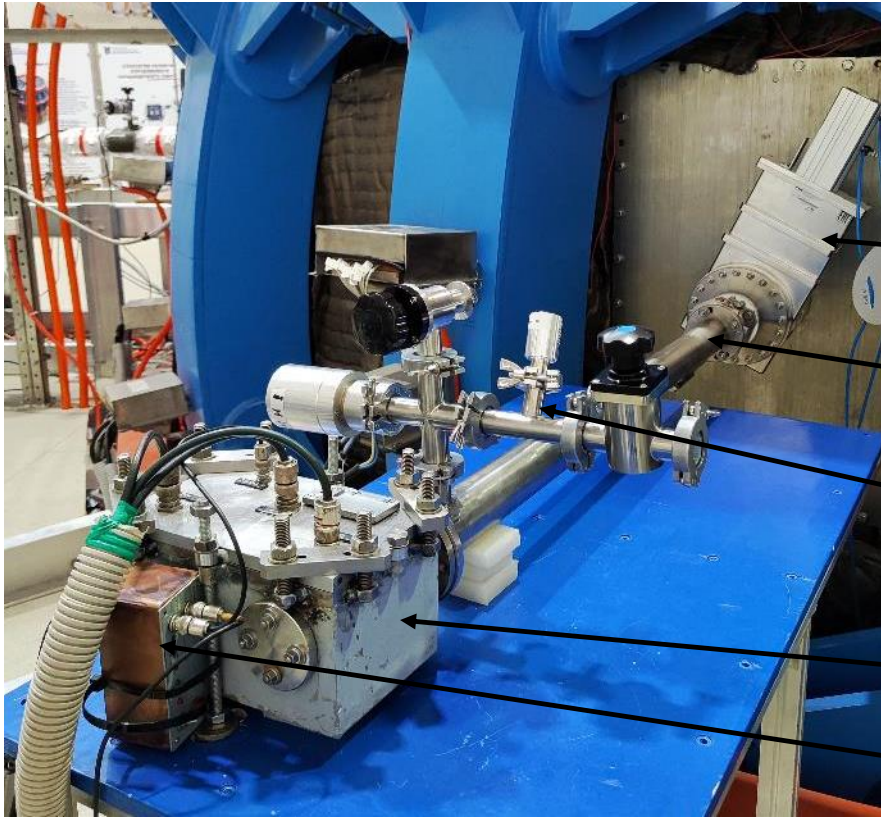


- Длины волн –  $468 \pm 5$ ,  $529 \pm 5$  и  $656 \pm 6$  nm
- Обратная линейная дисперсия – 0.34–0.5 nm/mm
- Спектральный контраст – до 775 000

- Основные измеряемые параметры: Ионная температура  $T_i(r)$ , концентрация протонов  $n_p(r)$  и примесей  $n_z(r)$ , температура  $T_p(r)^{fast}$  и плотность  $n_p(r)^{fast}$  быстрых протонов, скорость тороидального  $V_{tor}(r)$  и полоидального  $V_{pol}(r)$  вращения плазмы, радиальное электрическое поле  $E_r(r)$
- 30 точек по сечению плазмы, ожидаемое простр. разрешение от  $\leq 1$  см на LFS до  $\sim 8$  см на HFS
- Временное разрешение до 1 ms
- Ввод в эксплуатацию планируется в 2026, первые результаты ожидаются 2027



## Тестовый НРА Т-15МД



Анализатор располагается в 8 сечении в экваториальной плоскости и имеет нормальную линию наблюдения плазменного шнура

Двухпозиционная вакуумная задвижка

Атомопровод

Вакуумное оборудование для предварительной откачки и контроля

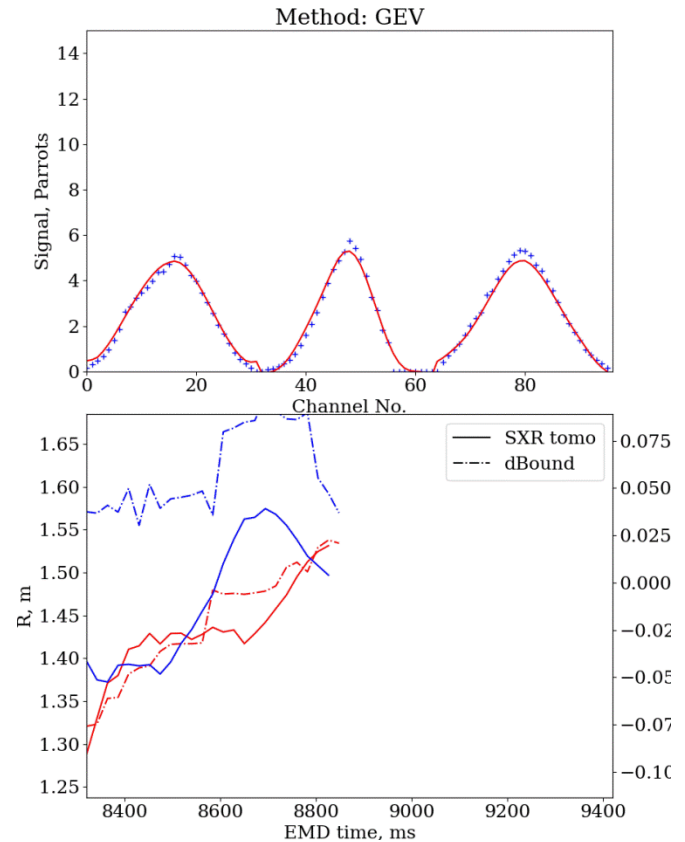
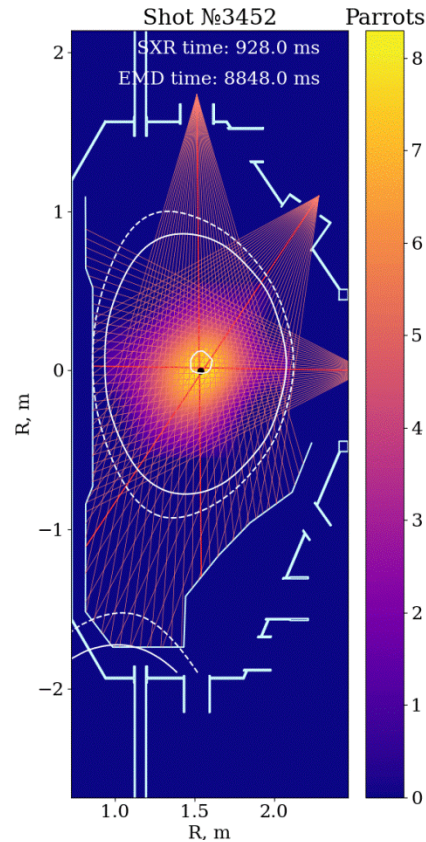
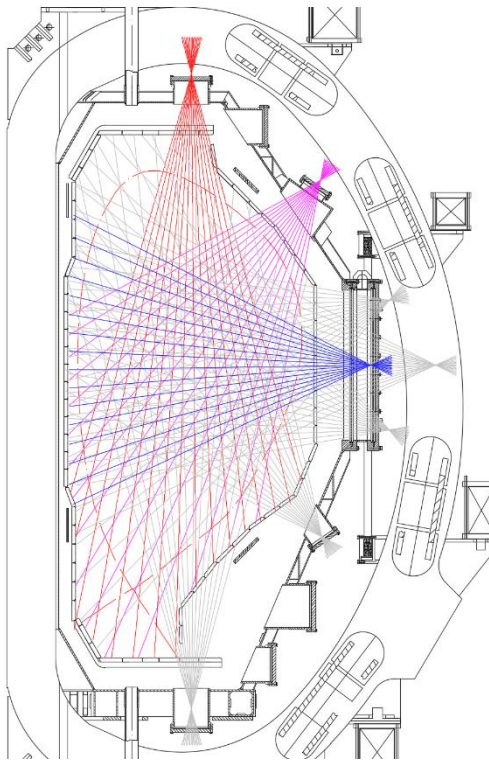
Корпус анализатора

Усилитель сигнала

- Энергетический диапазон: 0.5 – 5 keV; разрешение: пространственное  $\lesssim 12$  см, временное 5 – 50 ns
- Ввод в эксплуатацию ожидается в следующей экспериментальной кампании (2026 г.)
- **Основная задача: измерения ионной температуры плазмы**



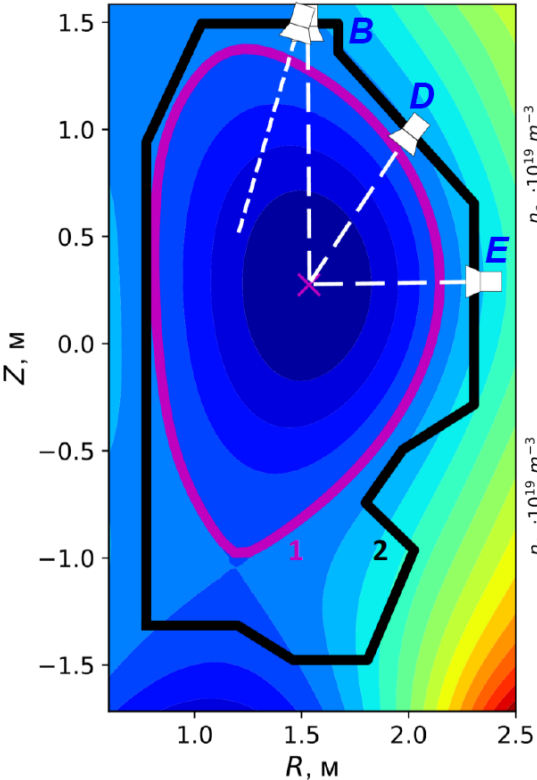
## Размещение SXR детекторов



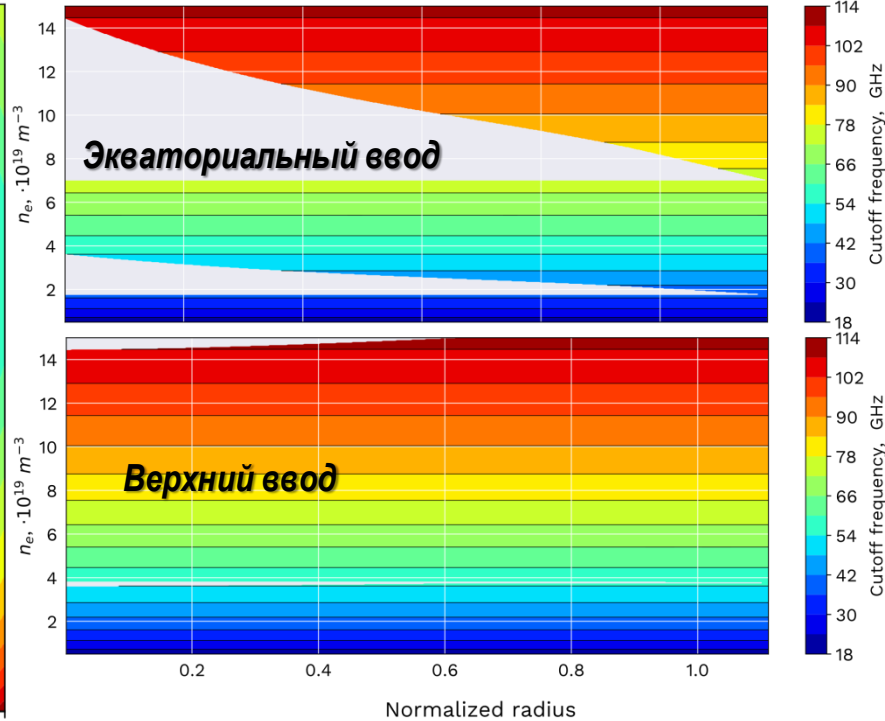
- 3 камеры обскуры в одном сечении (до 7 в перспективе)
- На каждой камере обскуры установлен 64-х канальный многопроводочный детектор
- Система сбора данных – одновременная регистрация каналов с частотой до 2МГц
- Код для томографической реконструкции интенсивности SXR в стадии тестирования
- **Основная задача: верификация положения центра шнура, исследование МГД активности горячей части**



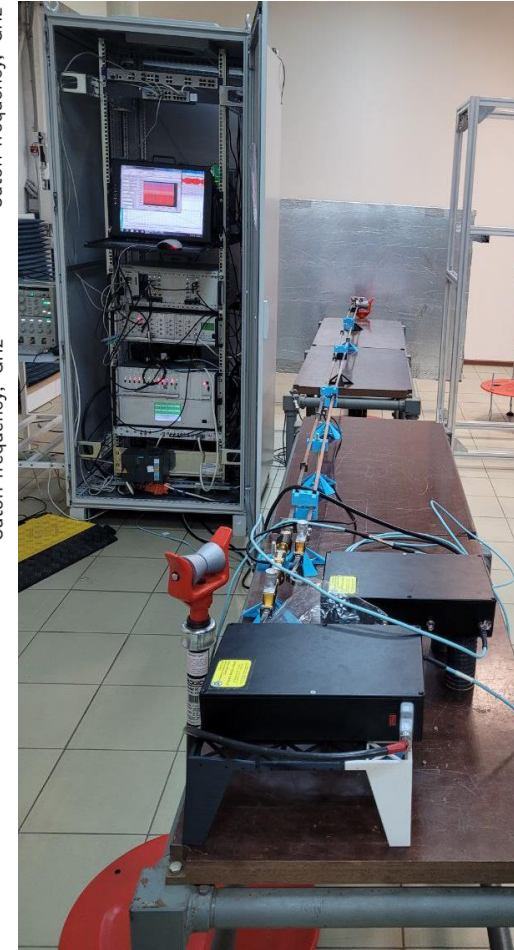
## Многоракурсное зондирование



## Доступность плазмы



## Макет корреляционного рефлектометра на стенде



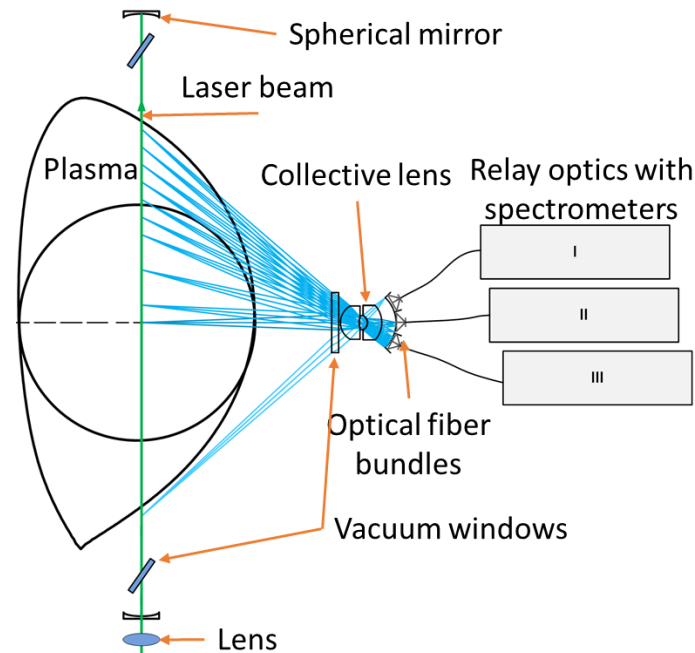
- Рефлектом. на фиксир./прыг./свибир. частоте, диапазон 18-60 GHz
- Многорупорное антенное устройство, зондирование на O или X-моде
- Частота флуктуаций до 0.5 MHz, чувствительность  $k_{\perp} \approx 5 \text{ cm}^{-1}$
- Ввод в экспл. диагностики на экваториальном патрубке в конце 2026
- **Основная задача: измерение параметров флуктуаций электронной плотности**



## **Диагностики на стадии разработки**

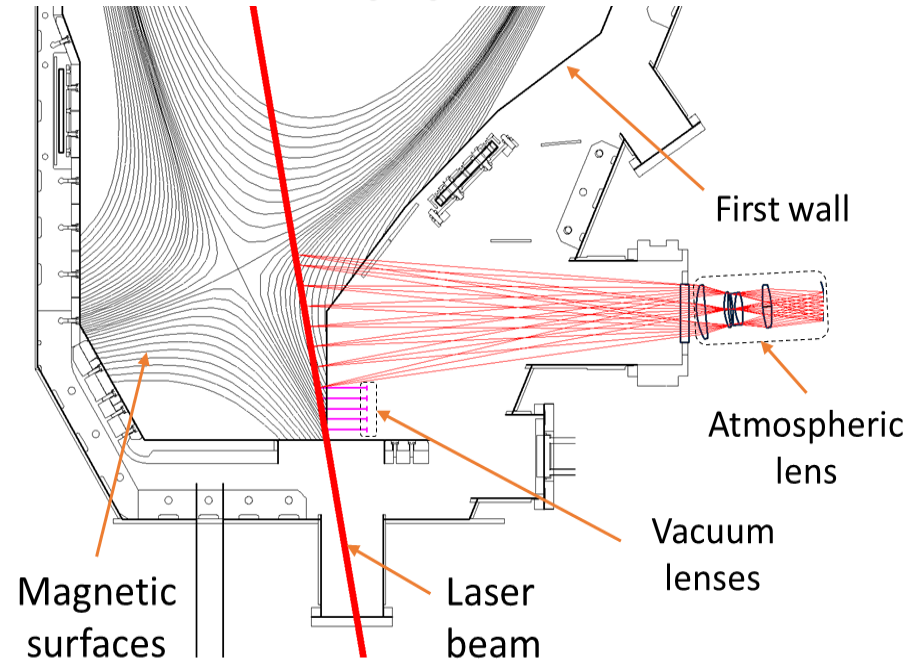


### Вертикальная TV система



- YAG лазер, вторая гармоника
- Пространств. разрешение:  $11 \div 24$  mm
- Число пространств. каналов: 159
- Многопроходная лазерная система
- Ожидаемая относит. ошибка  $< 10\%$  для  $25 \text{ eV} < T_e < 8 \text{ keV}$  и  $n_e > 10^{18} \text{ m}^{-3}$

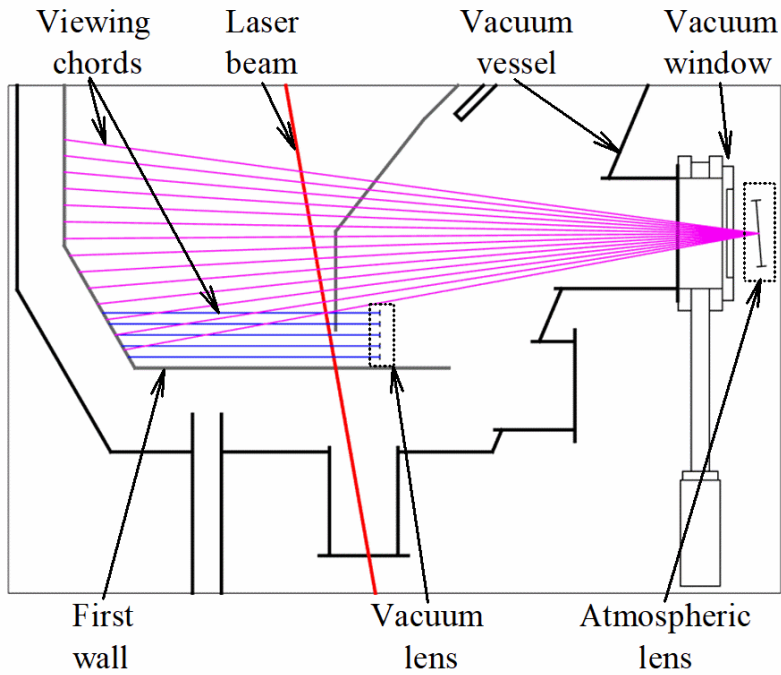
### Диверторная TV система



- 8 пространственных точек, расстояние 5 cm атмосферный объектива
- 5 пространственных точек, расстояние 2.5 cm вакуумные объективы
- Ожидаемая относит. ошибка  $< 20\%$  для  $1 \text{ eV} < T_e < 100 \text{ eV}$  и  $10^{18} \text{ m}^{-3} < n_e < 10^{21} \text{ m}^{-3}$

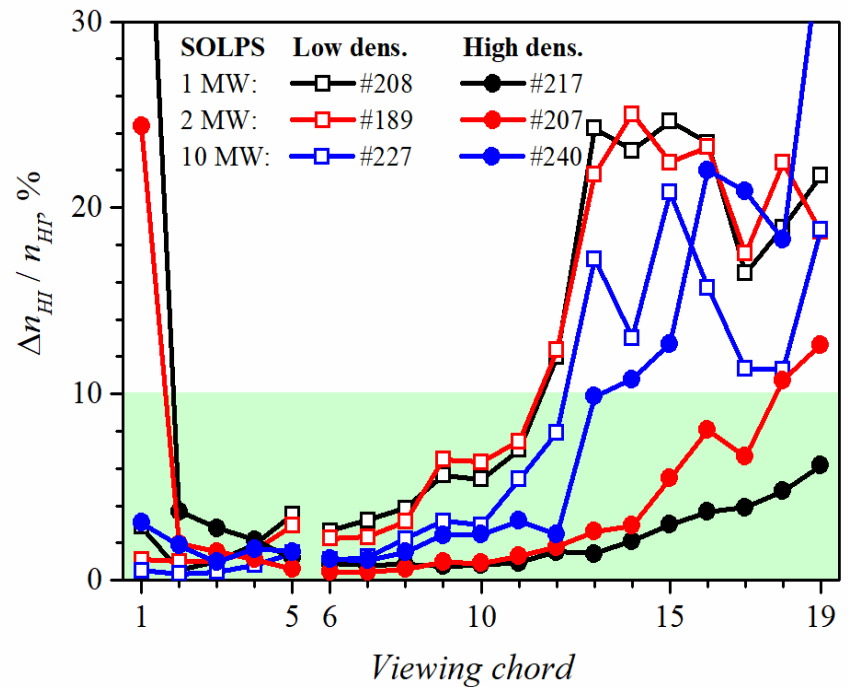
- **Основная задача: измерения профиля электронной температуры и плотности с высоким пространственным разрешением**

## Схема диагностики



- Целевая зона: “внешняя нога” дивертора
- Вакуумные и атмосферные объективы
- До 13 (5+8) хорд наблюдения

## Точность измерения

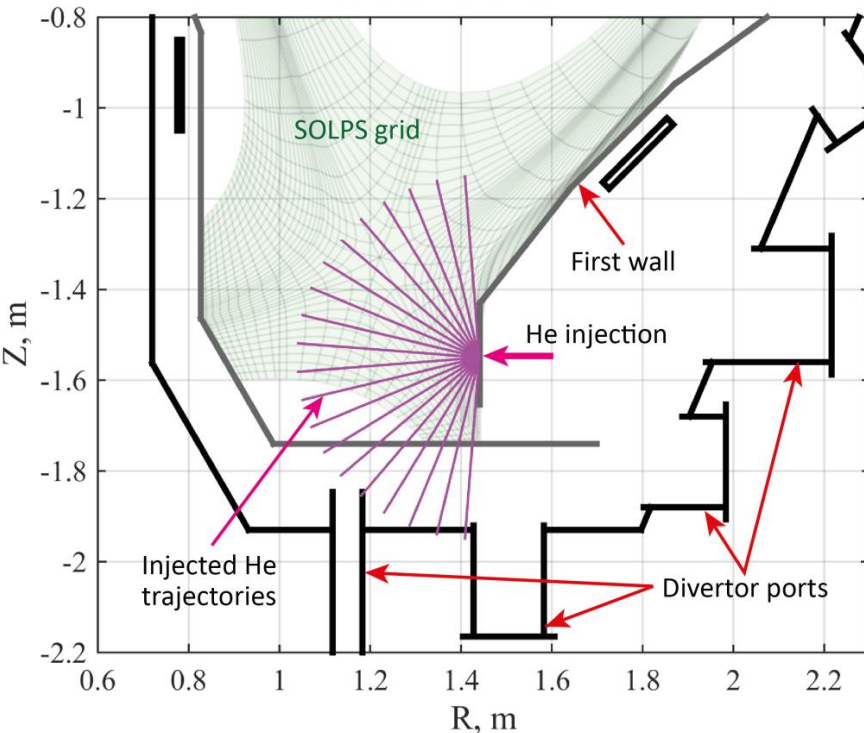


- Длина волны лазера:  $1875 \pm 2$  nm
- Частота импульсов: 1 MHz
- Временное разрешение: 10 ms (до 1 ms)

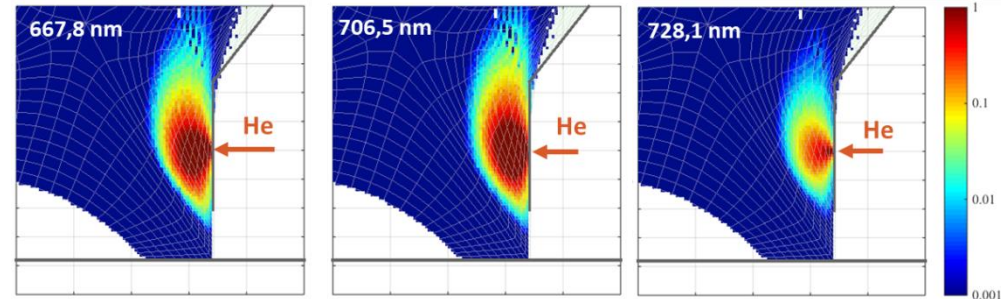
- Основная задача: измерения концентрация  $n_a(H)$  и температура атомов в диверторе



### T-15MD divertor



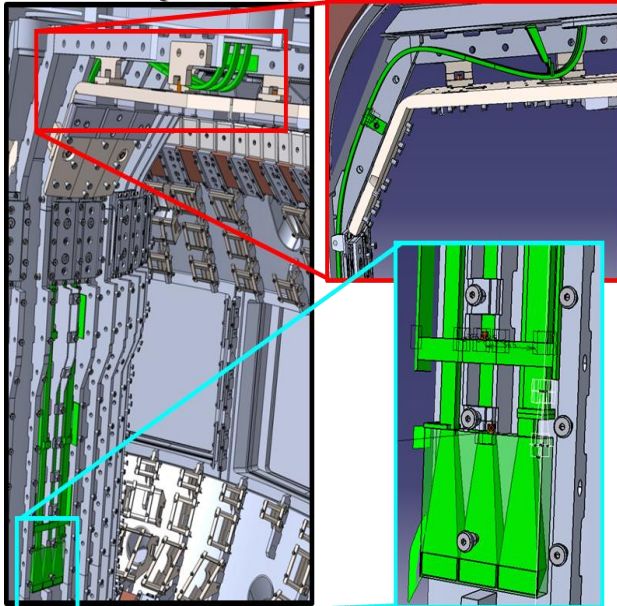
### Интенсивность линий HeI (относительные единицы)



- Целевая область: “внешняя нога” дивертора Т-15МД
- В данный момент, проводится моделирование инжекции гелия в плазму с помощью столкновительно-излучательной модели и кода SOLPS
- Оптическая система будет разрабатываться на основе результатов моделирования
- **Основная задача: измерение профилей  $n_e$  и  $T_e$  профили в диверторе**



### Схема размещения HFS ввода



### Макет микроволнового управляющего модуля ITER



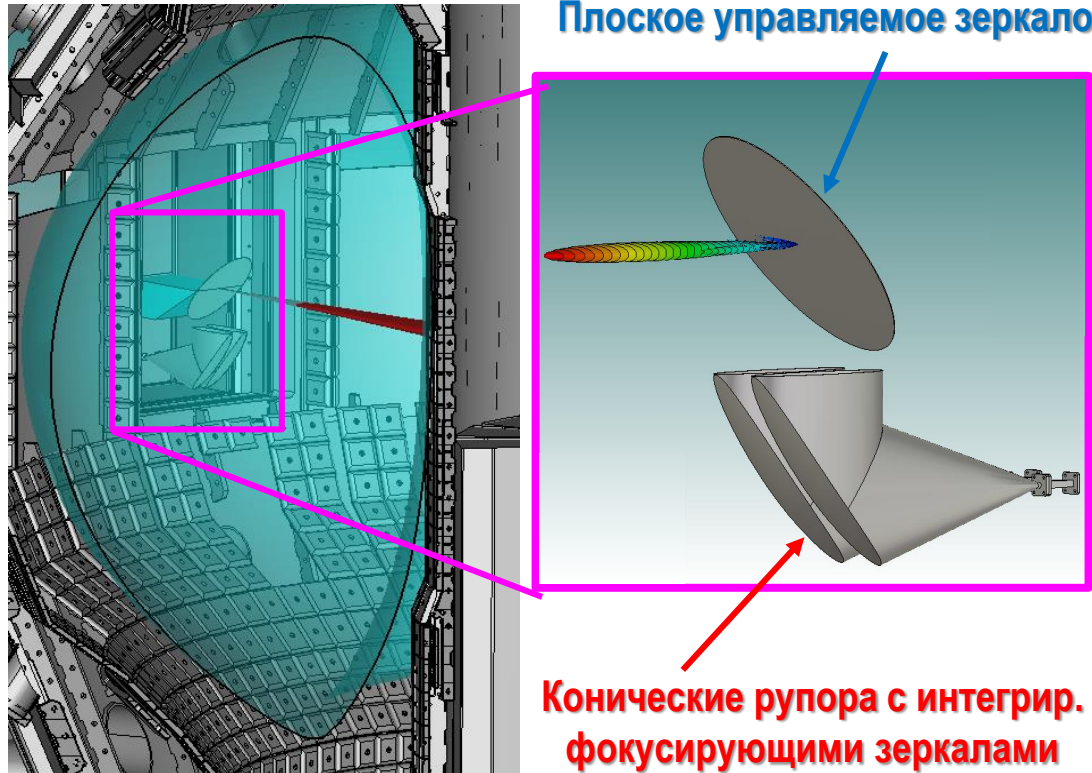
### Макет системы сложения ITER



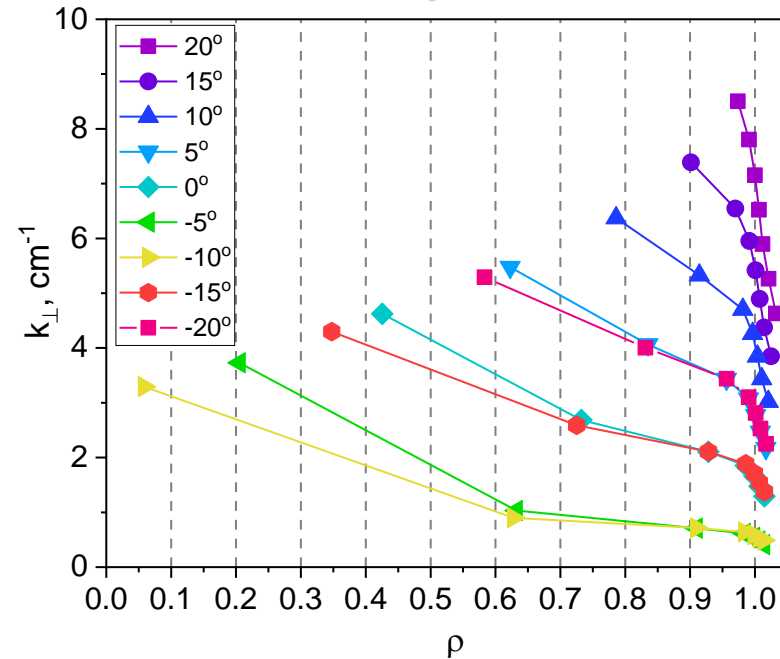
- ITER-like схема: HFS зондир., O-мода (периферия) + X-мода (центр)
- Рефлектометры в 4 диапазонах от 12 до 66 GHz для O и X-моды
- Измеряемая плотность  $(0.2 \div 7) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , от SOL до магнитной оси
- Область измерения ограничивается поглощением на ЕС резонансе
- ITER-like VCO / SSBM - based FMCW рефлектометр
- ITER-like система слож. на многосл. диэлектр. Bragg фильтрах
- Временное разрешение (длинный импульс)  $\sim 1 \text{ ms}$
- Пространственное разрешение  $\lesssim 5 \text{ mm}$
- **Основная задача: измерение профиля  $n_e$  с высоким пространственным и временным разрешением**



## DBS front-end



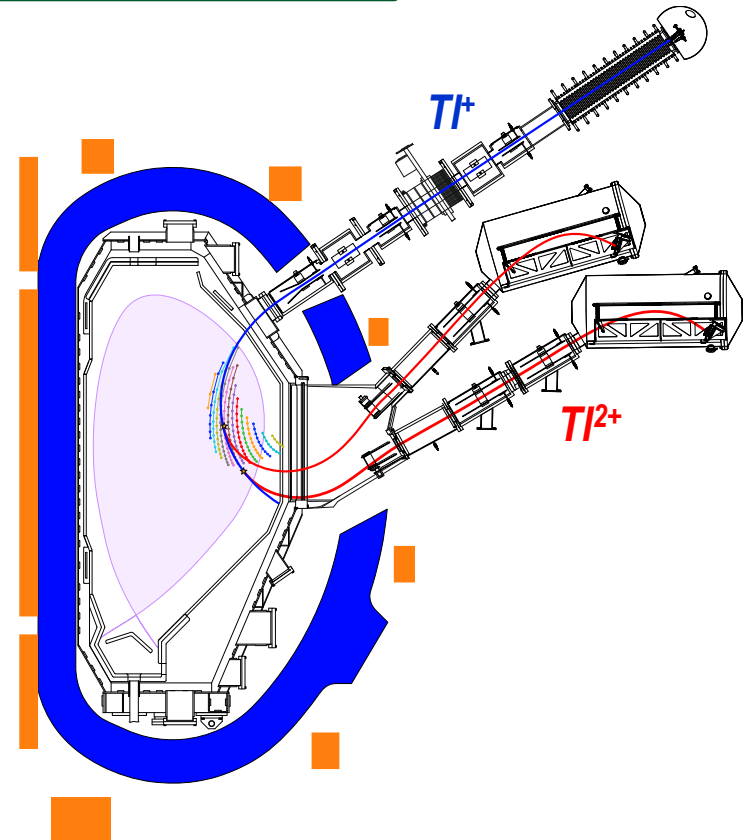
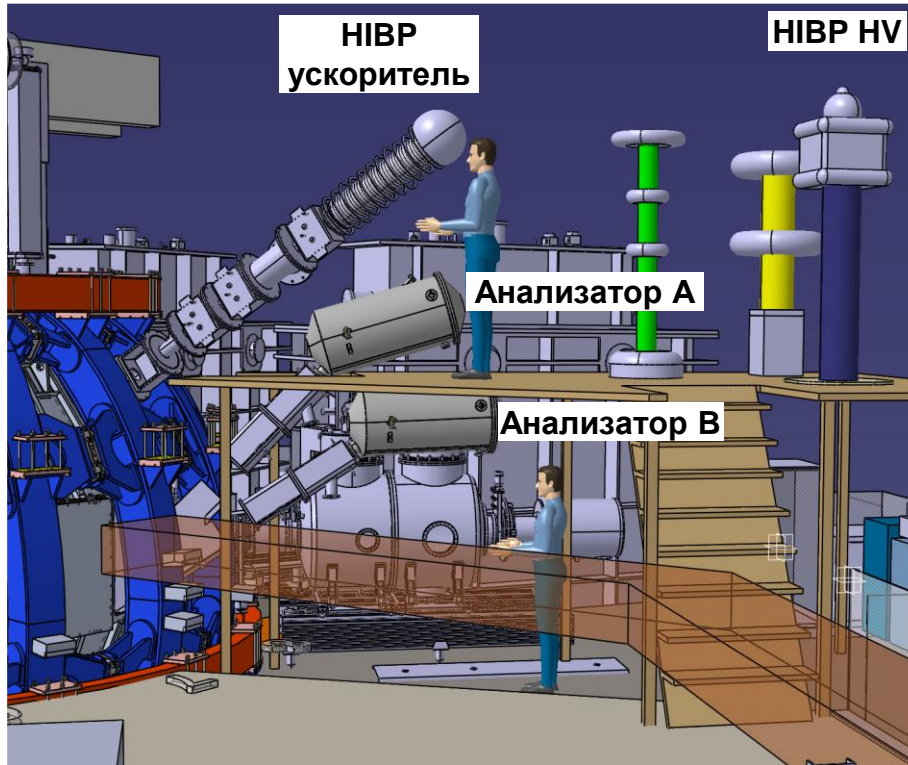
## Область измерений и размер возмущений



- Измерения возмущений со среднеразмерным и высоким  $k_{\perp}$  на внешней половине радиуса плазмы
- Гетеродинный рефлектометр с малозумящим синтезатором миллиметровых волн и активными умножителями, диапазоны зондирующих частот Q и V (33-75 GHz)
- **Основная задача: измерения параметров возмущений со среднеразмерным и высоким  $k_{\perp}$  на внешней половине радиуса плазмы**



## НИВР размещение на T-15MD



- Ионы  $T^+$ , энергия до 360 kV, 7-мь пространственных каналов в каждом анализаторе частиц
- Пространственное разрешение 2 см, временное разрешение до 500 kHz
- Зондирование до центра плазмы при 1 T, внешняя половина малого радиуса при 1.5 T
- Основная задача: измерения потенциалы плазмы, параметров флуктуаций потенциала, плотности и полоидального магнитного поля, полоидального электрического поля и скорости вращения плазмы



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**