

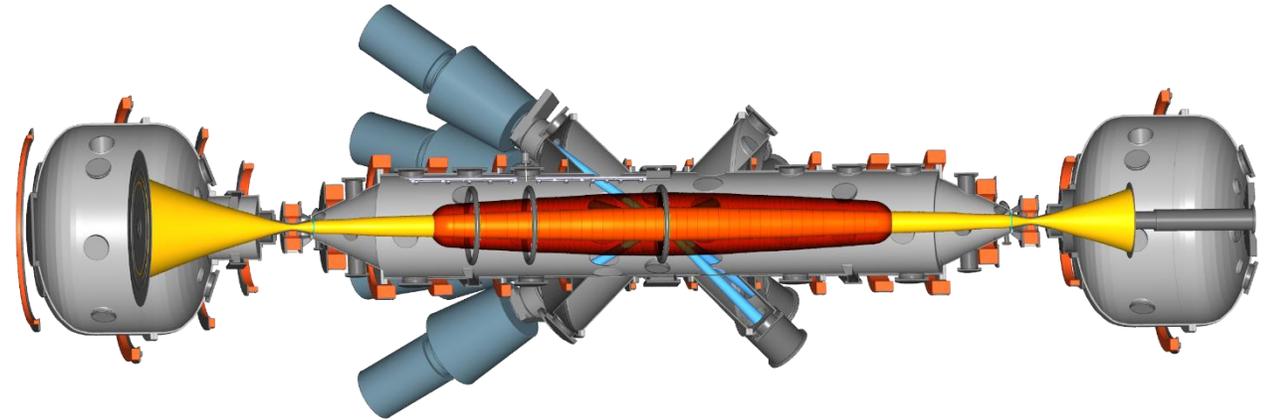
Научная сессия ИЯФ
27 февраля 2026

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА В 2025 ГОДУ

Солдаткина Елена Ивановна
Лаборатория 9-1

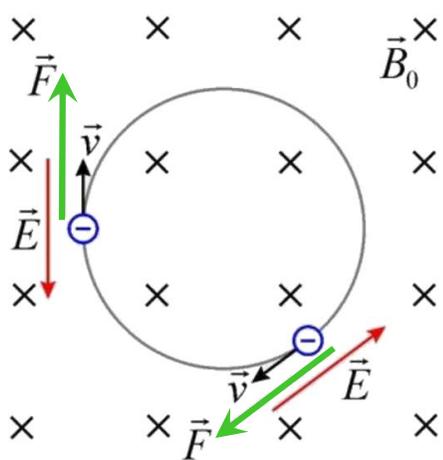
Газодинамическая ловушка в 2025 году

1. Измерение относительного давления плазмы в конфигурациях с укороченной областью удержания горячих ионов
2. Эксперименты с подвижным лимитером и разработка метода стабилизации МГД-мод проводящей стенкой
3. Изучение порогов кинетических неустойчивостей
4. Модернизация диагностического комплекса установки
5. **Экспериментальная кампания по ЭЦР нагреву плазмы**



Параметр	Значение
Расстояние между пробками	7 м
Магнитное поле в центре	0.36 Т
Магнитное поле в пробке	до 14 Т
Длительность атомарной инжекции	5 мс
Мощность атомарной инжекции	5 МВт
Плотность теплой плазмы	до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Энергия быстрых ионов	9 кэВ
Максимальное относительное давление плазмы	60%
Температура электронов	250 эВ

ЭЦР нагрев плазмы



В магнитном поле электроны плазмы движутся по винтовым траекториям с циклотронной частотой

$$\omega_{Be} = \frac{e B}{m_e c}.$$

Если в плазму ввести электромагнитную волну циклотронной частоты с круговой поляризацией, вращающейся в ту же сторону, что и электроны, то такая волна будет эффективно поглощаться электронами, а следовательно, увеличивать электронную температуру плазмы.

- В двухкомпонентной плазме с горячими ионами (как в ГДЛ) время жизни быстрых ионов $\tau_E \propto T_e^{3/2}$.
- Температура электронов является основным фактором, ограничивающим время удержания быстрых ионов, а значит, и энергетическую эффективность термоядерного реактора на основе открытой ловушки.
- Дополнительный нагрев электронов критически важен! Причем греть нужно тепловые электроны по всему радиусу плазменного столба.

ЭЦР нагрев в токамаках

- **Начальный нагрев и ионизация:** создание предварительной плазмы до запуска основного тока.
- **Локальность нагрева:** благодаря четкой локализации поглощения, ЭЦР позволяет управлять профилем температуры.
- **Генерация тока:** позволяет создавать неиндукционный ток, что важно для квазинепрерывной работы токамака.
- **Стабилизация неустойчивостей:** подавление магнитогидродинамических возмущений.

Токамак Т-15МД,
Курчатовский институт



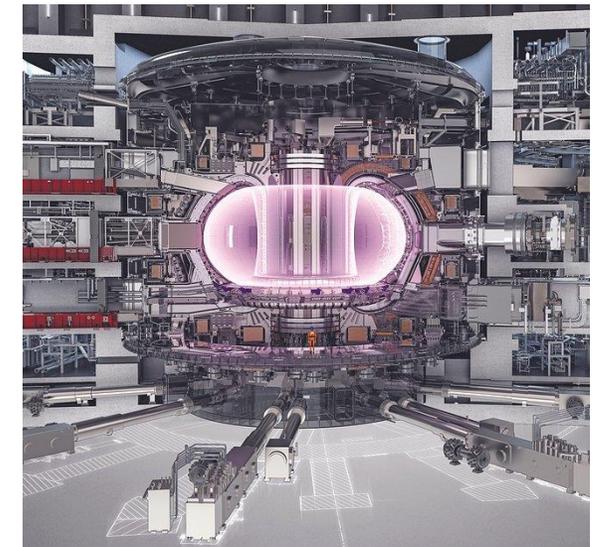
8 гиротронов 82 – 105 ГГц по 1 МВт

Токамак EAST, КНР



6 гиротронов 105 – 140 ГГц по 1 МВт

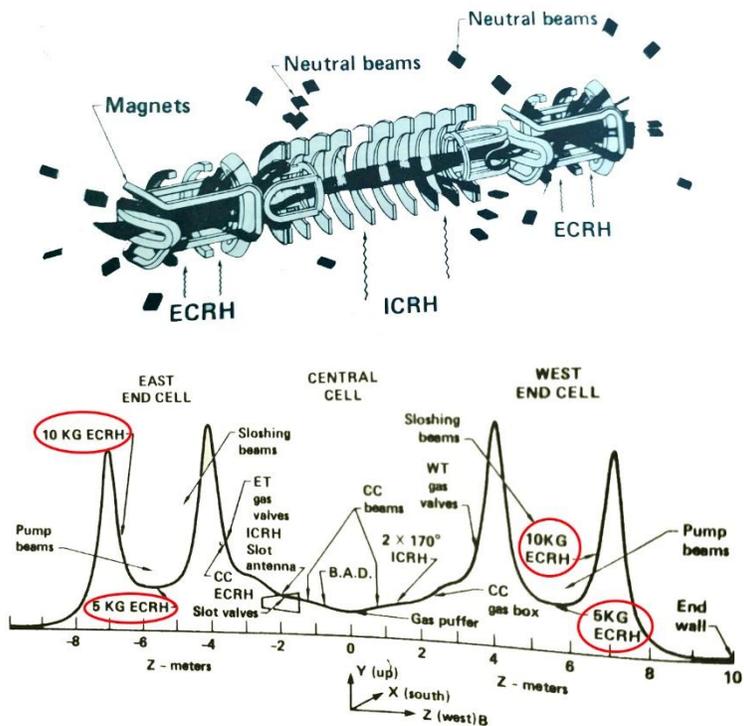
Международный токамак ITER



Планируется 48 гиротронов
170 ГГц по 1 МВт

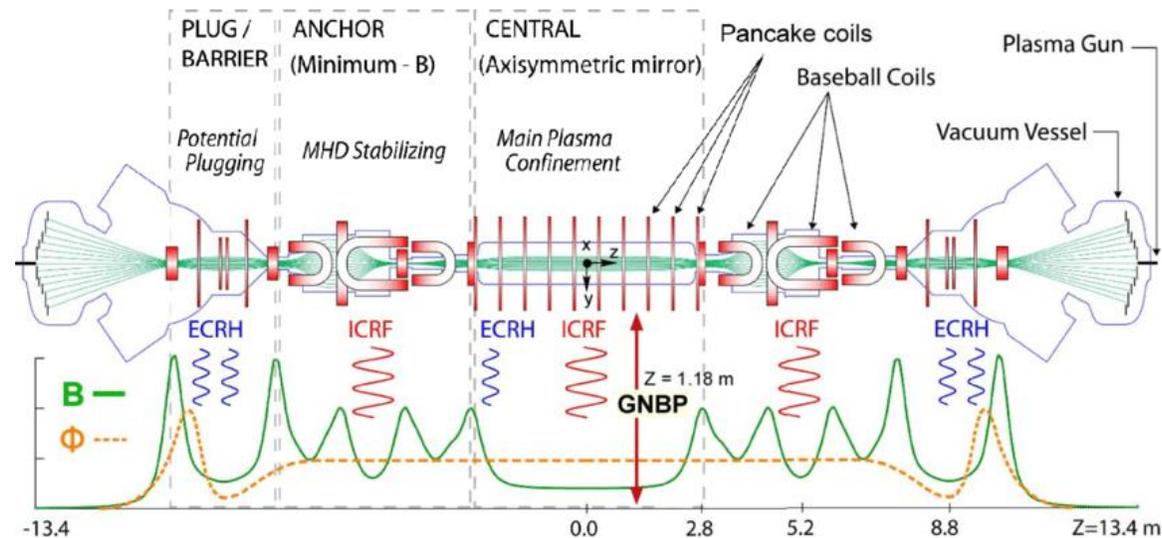
ЭЦР нагрев в открытых ловушках

Установка ТМХ-U, США, 1980-е годы



4 гиротрона 28 ГГц по 200 кВт каждый
Показана возможность создания
термобарьера в амбиполярной ловушке

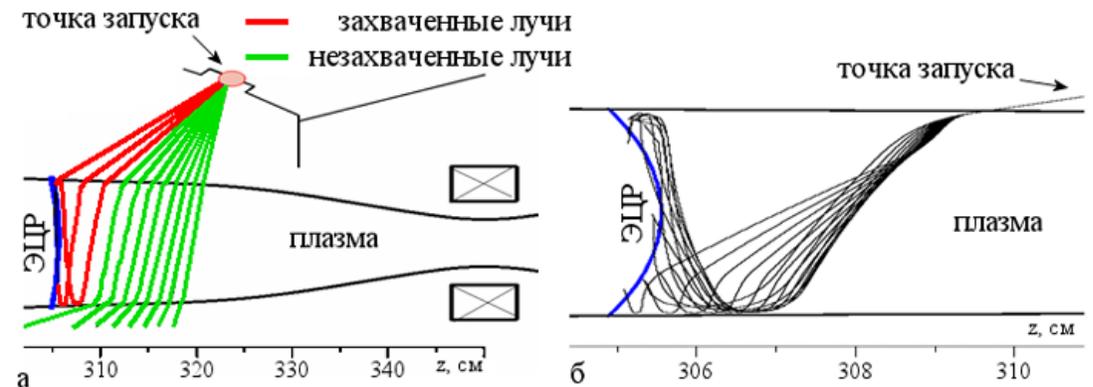
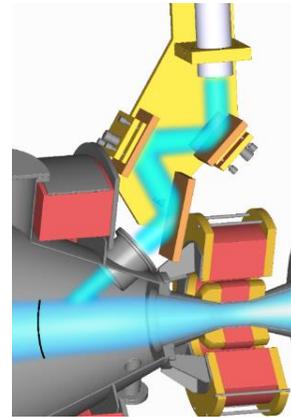
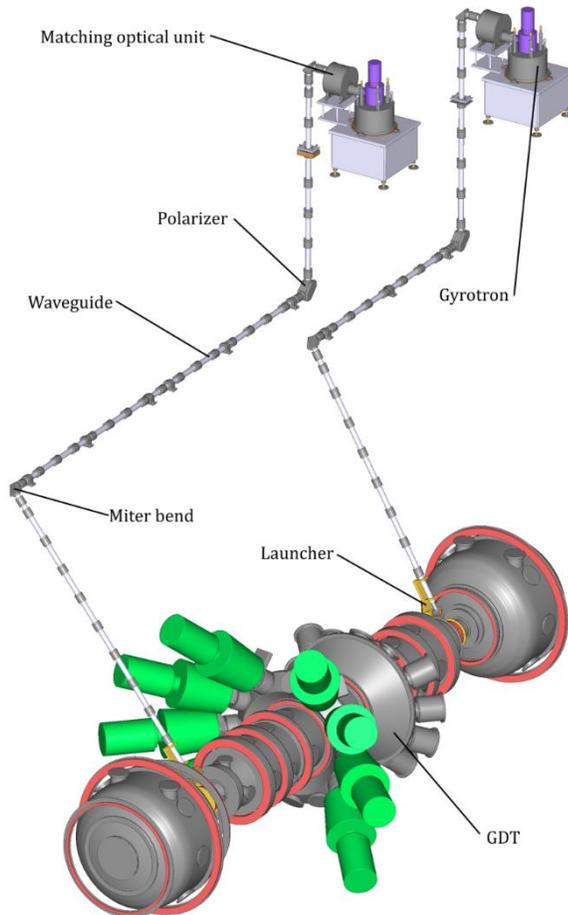
Установка ГАММА10, Япония, 1983 - ...



2 гиротрона 28 ГГц по 500 кВт – в амбиполярных
пробках, 1 гиротрон 77 ГГц, 1МВт – в центре
Нагрев электронов (до 100 эВ в центральной
ячейке), управление радиальным профилем
потенциала

ЭЦР нагрев в ГДЛ – версия 2012 года

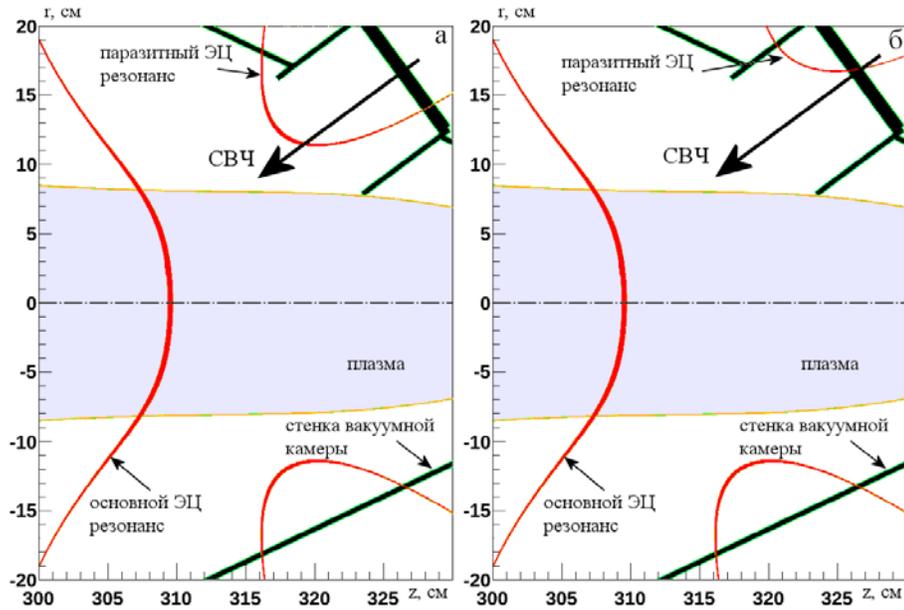
2 гиротрона «Буран-А»
54.5 ГГц по 400 кВт



- Расчеты, проведенные в ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) в приближении геометрической оптики, показали, что максимально эффективно в плазму ГДЛ должна захватываться необыкновенная волна на первой гармонике (1X) СВЧ излучения;
- Излучение должно вводиться в плазму со стороны сильного магнитного поля под малым углом к его оси;
- Первая гармоника излучения испытывает рефракцию при движении в меняющемся магнитном поле и может быть доставлена до зоны ЭЦР резонанса по плазме, как по волноводу, отражаясь от ее границ;
- Поглощение излучения идет преимущественно на тепловых электронах.

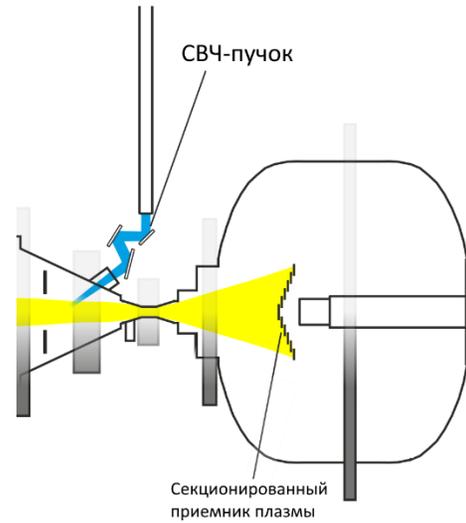
ЭЦР нагрев в ГДЛ – версия 2012 года

Паразитный резонанс

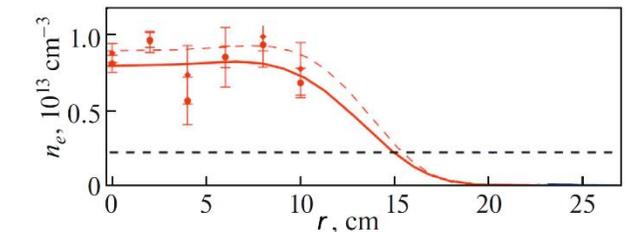
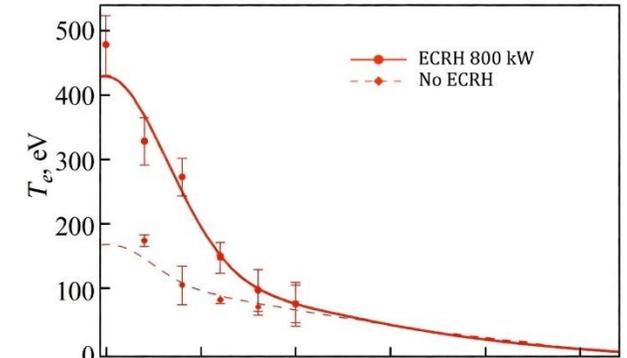
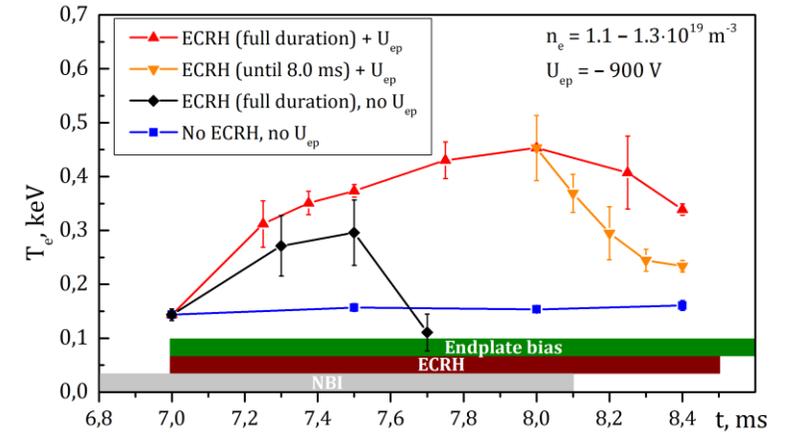


Перед входом в плазму волна неизбежно пересекает поверхность ЭЦР резонанса со стороны слабого поля. При наличии в этом месте плазмы с заметной плотностью часть волны отражается, а оставшаяся поглощается на периферии. Проблема была устранена за счет локального усиления магнитного поля.

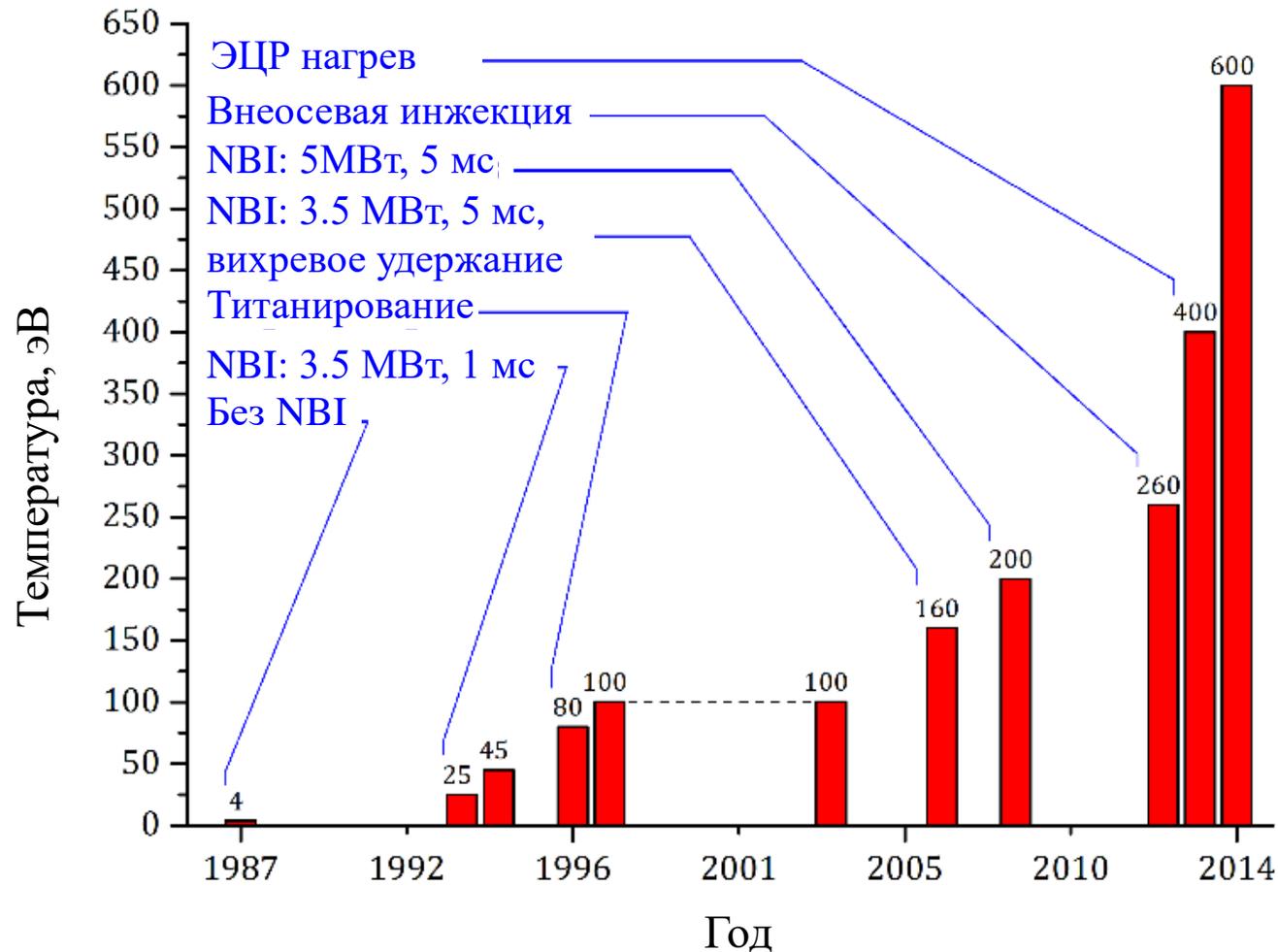
Перегревная неустойчивость



При наличии резкого градиента электронной температуры в плазме развиваются неустойчивости Рэля-Тейлора, Кельвина-Гельмгольца... Устойчивости удалось добиться, применив профилирование радиального потенциала торцевых приемников плазмы, при котором перегретая область плазмы проецируется на пластину с потенциалом -900 В.



Эволюция электронной температуры в ГДЛ



Электронная температура на оси	Количество импульсов
300 – 500 эВ	165
500 – 700 эВ	43
700 – 900 эВ	8
900 – 1100 эВ	3

LENTA.RU 18 февраля, 14:08

Наука и техника: Все Наука В России Космос Оружие История Здоровье Будущее **Техника**

14:12, 5 декабря 2013 Наука и техника

В Новосибирске поставили рекорд по разогреву плазмы микроволнами

Ученые из Института ядерной физики Сибирского отделения РАН поставили рекорд по разогреву плазмы в газодинамической ловушке. Им удалось достичь температуры в 4,5 миллиона градусов. Подробности приводит [ИТАР-ТАСС](#) со ссылкой на заместителя директора института Александра Иванова.



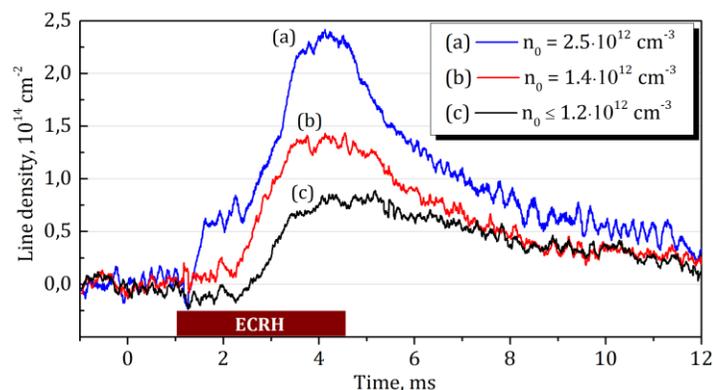
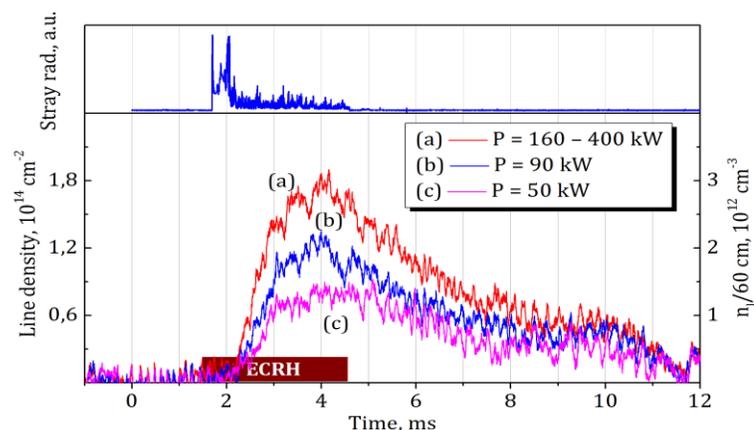
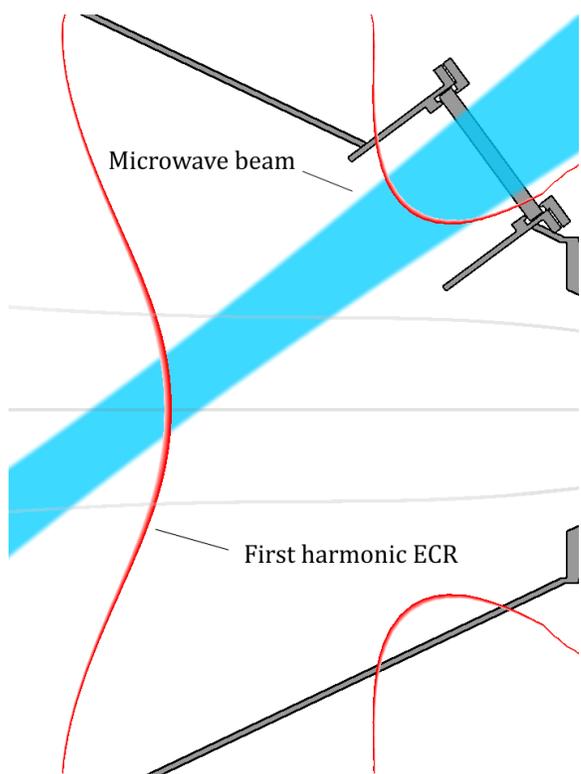
Установка ГДЛ. Фото: официальный сайт ИЯФ СО РАН имени Биддера

Специалисты новосибирского научного центра использовали газодинамическую ловушку ГДЛ, построенную в 1986 году. Устройство создает поток плазмы в вакуумной камере, которая направляется магнитным полем вдоль оси вытянутого цилиндра. Далее плазма встречается с пучками нейтральных атомов и облучается

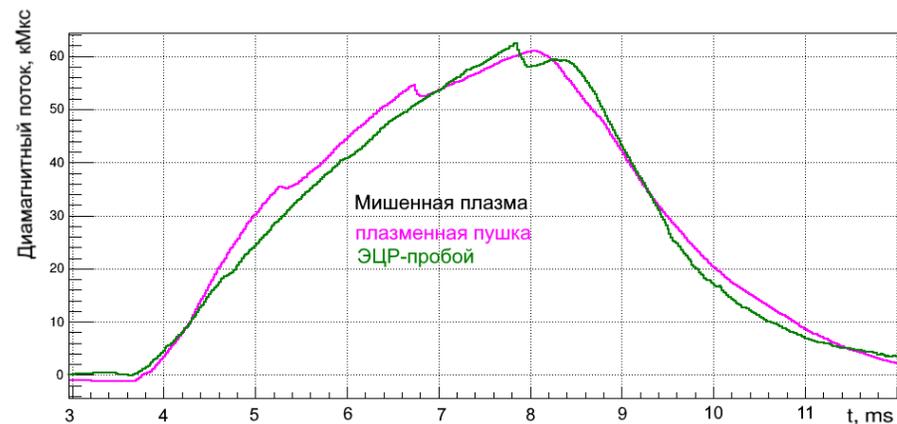
ЭЦР пробой

При помощи СВЧ-пробоя можно создавать мишенную плазму для последующего захвата атомарных пучков в ГДЛ. Используется тот же гиротрон 400 кВт 54.5 ГГц, 1X волна, поглощение мощности на первом проходе в области ЭЦР.

Установка предварительно заполняется газообразным дейтерием до уровня $1-2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Мощности порядка 50 кВт достаточно для пробоя (100 мкс), далее выход на стационар по плотности за 2 мс.



Накопление горячих ионов в ловушке при создании предварительной плазмы с помощью плазменной пушки и ЭЦР-пробоя происходит одинаково эффективно

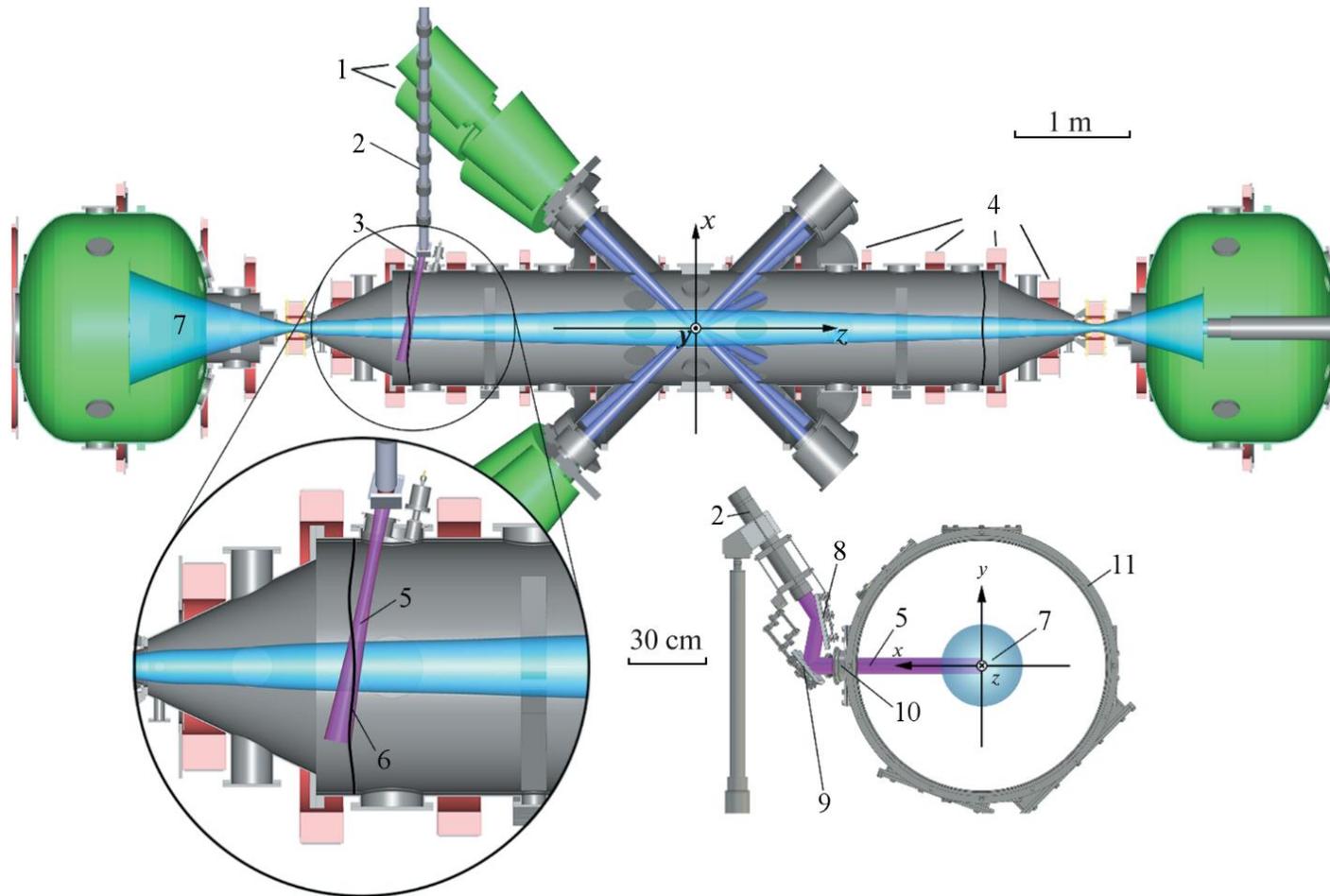


ЭЦР нагрев в ГДЛ – версия 2023 года

Необыкновенная волна на **второй гармонике** СВЧ излучения

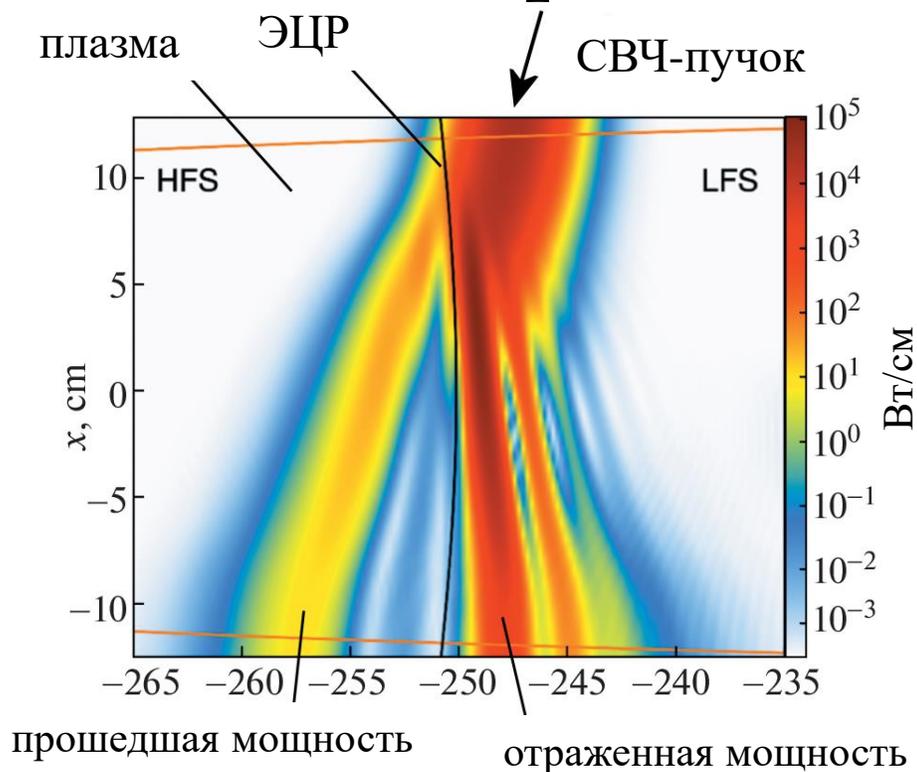
$$\omega_{ECR}^{2X} = 2 \omega_{Be}$$

При той же частоте гиротрона 54.5 ГГц появляется возможность удобнее вводить излучение в области более слабого поля.



- 1 – инжекторы нейтральных атомов,
- 2 – волноводный тракт от гиротрона,
- 3 – система ввода излучения в ГДЛ,
- 4 – магнитная система ГДЛ,
- 5 – СВЧ пучок,
- 6 – ЭЦР,
- 7 – плазма,
- 8 – плоское зеркало,
- 9 – фокусирующее зеркало,
- 10 – вакуумное окно,
- 11 – вакуумная камера ГДЛ

ЭЦР нагрев в ГДЛ – версия 2023 года



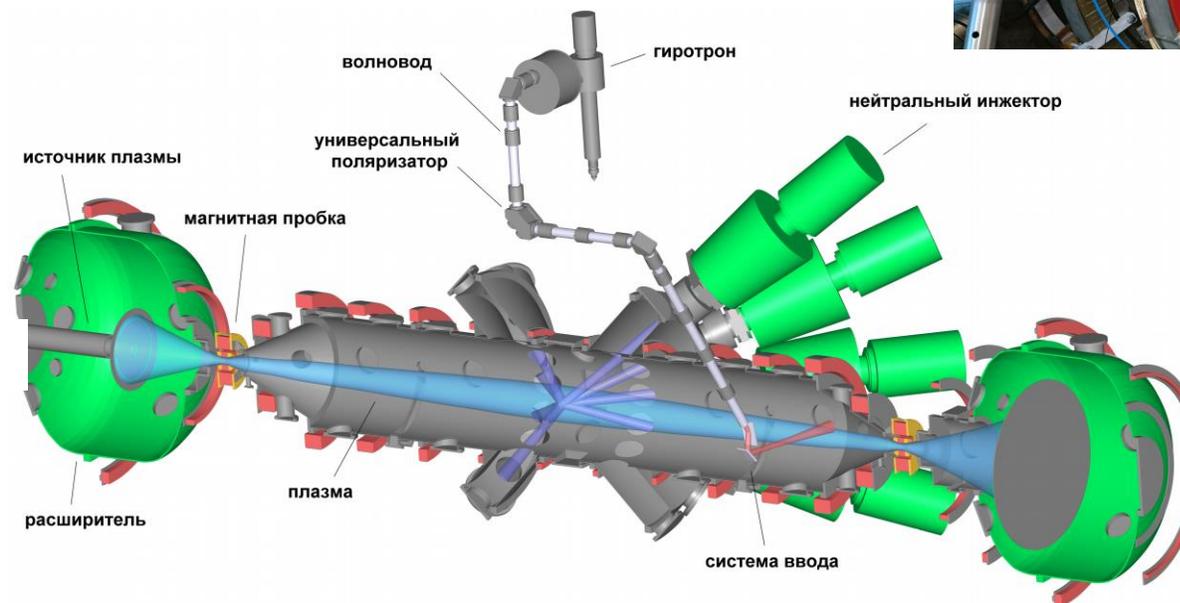
Распределение электрического поля пучка
гиротрона

HFS — сторона сильного поля

LFS — сторона слабого поля

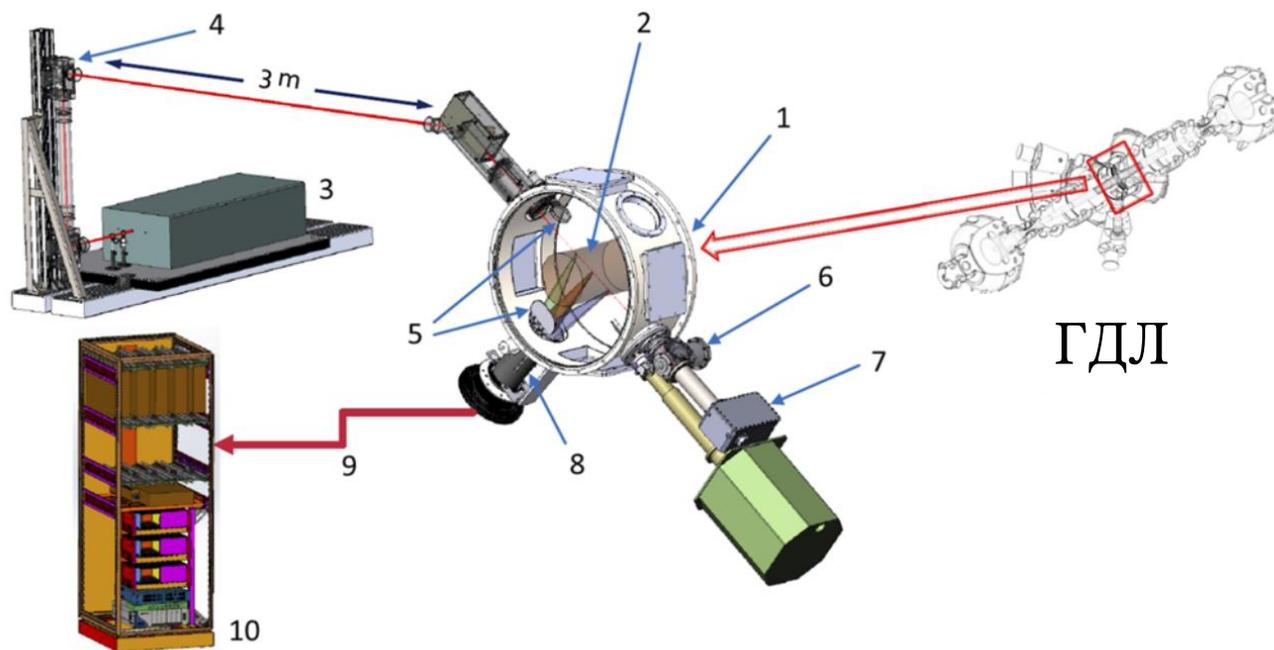
Гиروتрон GLGD 54.5/0.8/0.05

- Импульсная СВЧ мощность – 0.82 МВт
- Рабочая частота – 54.47 ГГц
- Длительность импульса – 50 мс,
система питания на 10 мс



Квазиоптическое моделирование ЭЦР нагрева для ГДЛ показало, что около 45% вводимой мощности захватывается плазмой при вводе излучения со стороны слабого магнитного поля

Томсоновское рассеяние

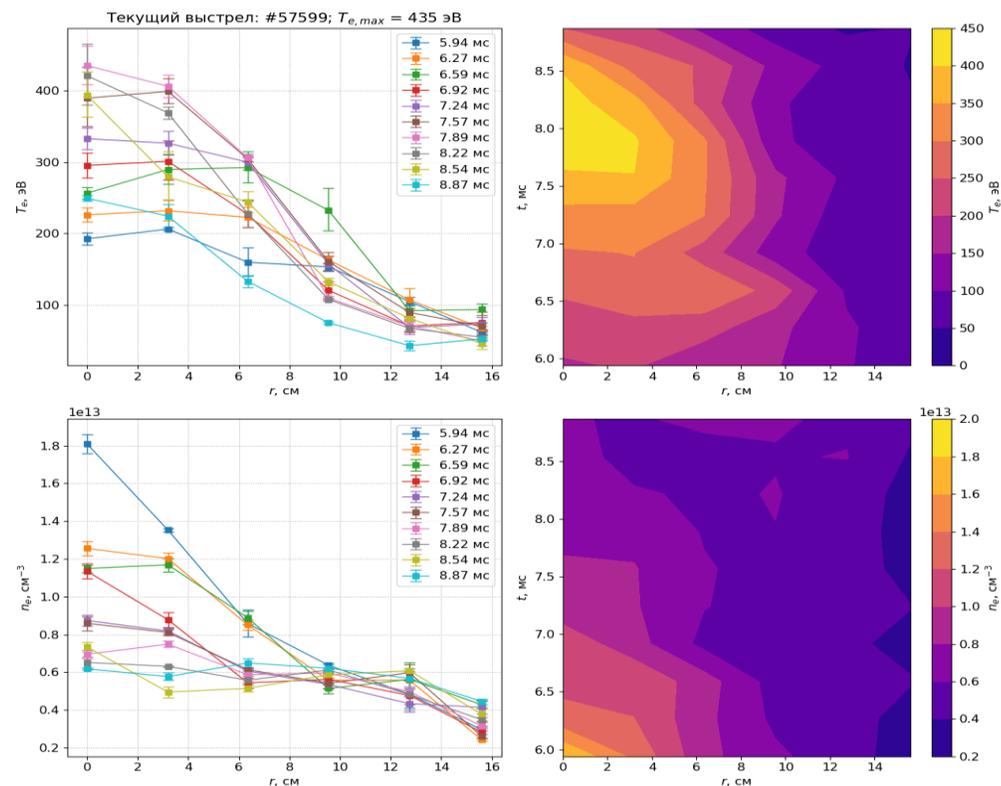


ГДЛ

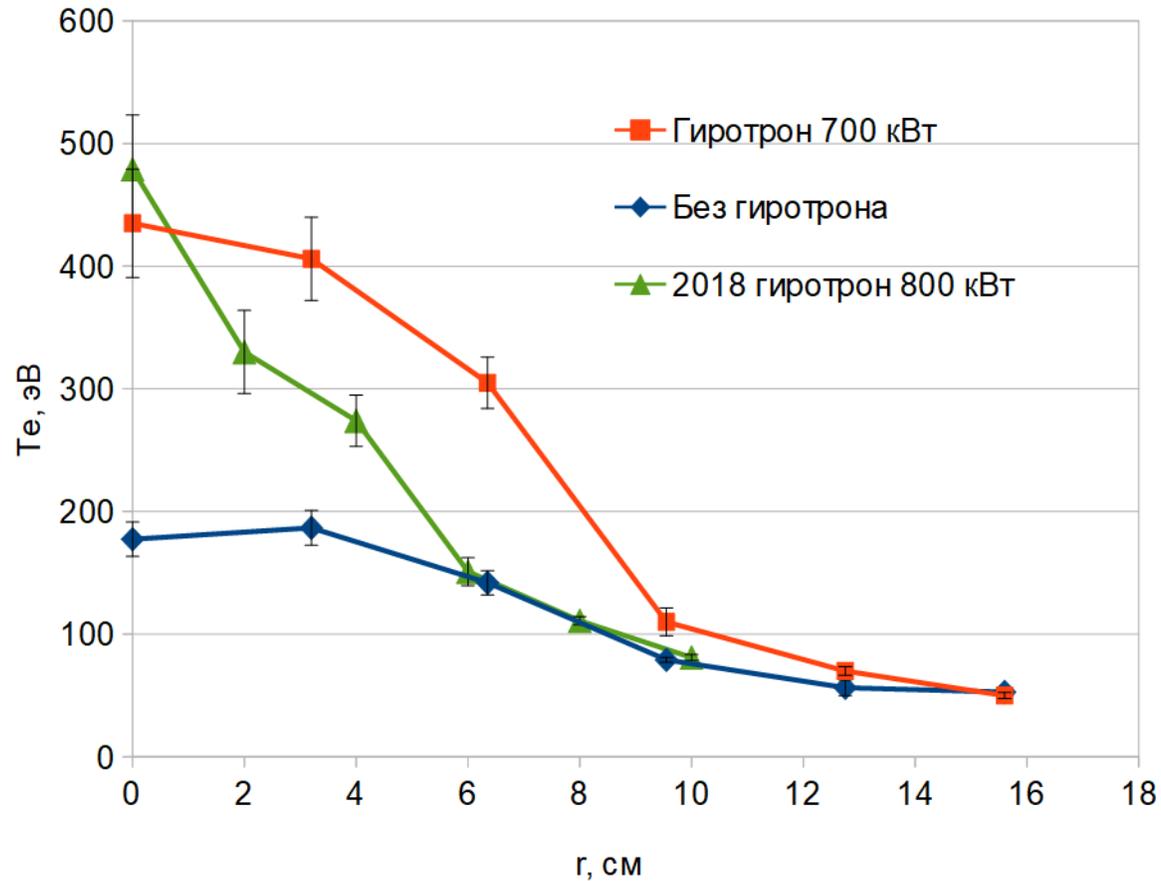
Схема системы томсоновского рассеяния на ГДЛ

1 — центральная камера ГДЛ, 2 — плазма, 3 — оптический стол с лазером, 4 — моторизованная система юстировки, 5 — заслонки от титана, 6 — подвижный модуль юстировки лазерного луча, 7 — поглотитель пучка, 8 — система сбора света, 9 — оптоволокну, 10 — шкаф со спектрометрами

Диагностика позволяет измерять радиальные профили температуры и плотности плазмы в 6 точках по радиусу и 10 точках по времени в одном рабочем импульсе.

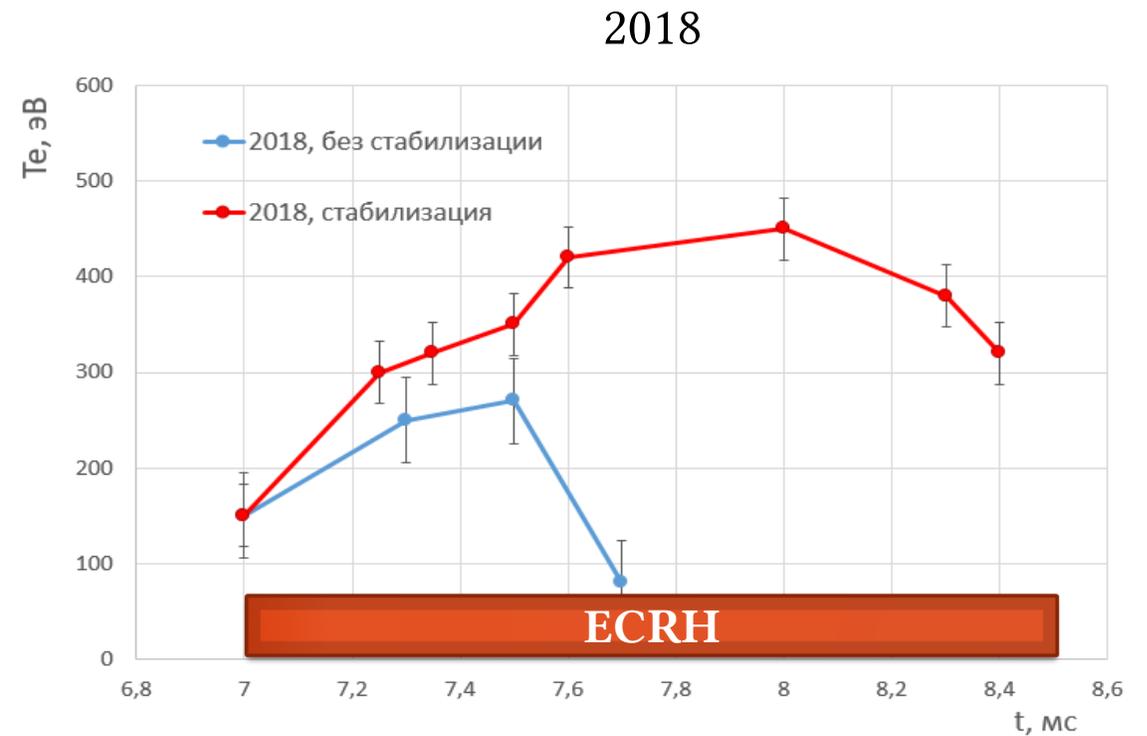
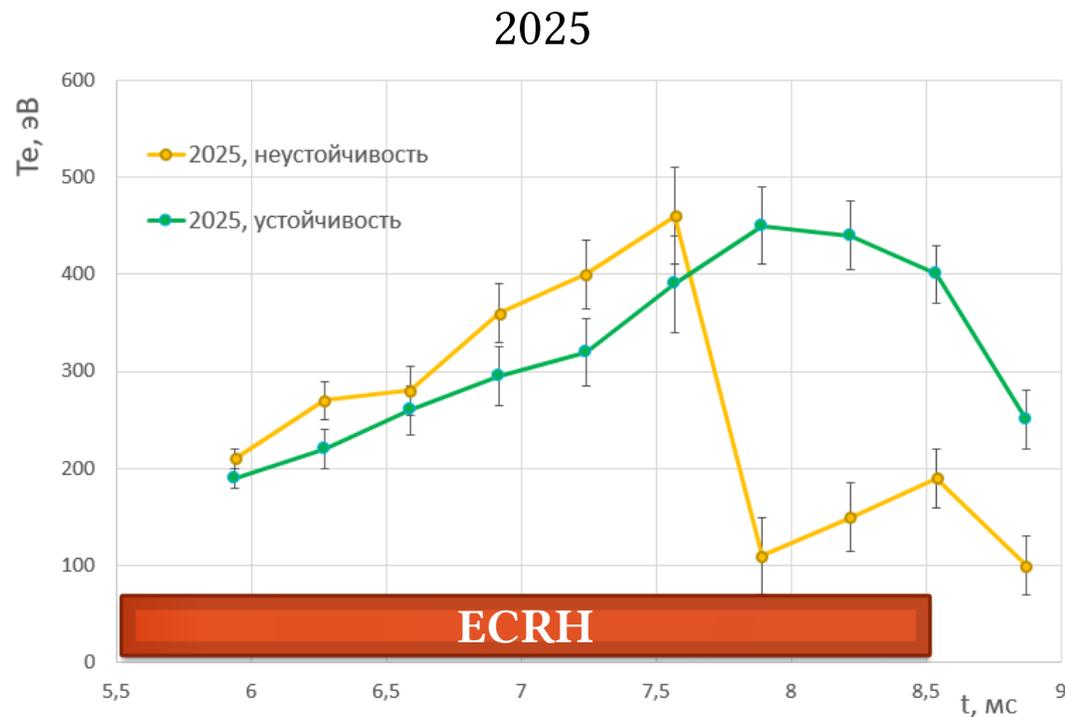


Удержание плазмы при СВЧ нагреве – 2025 год



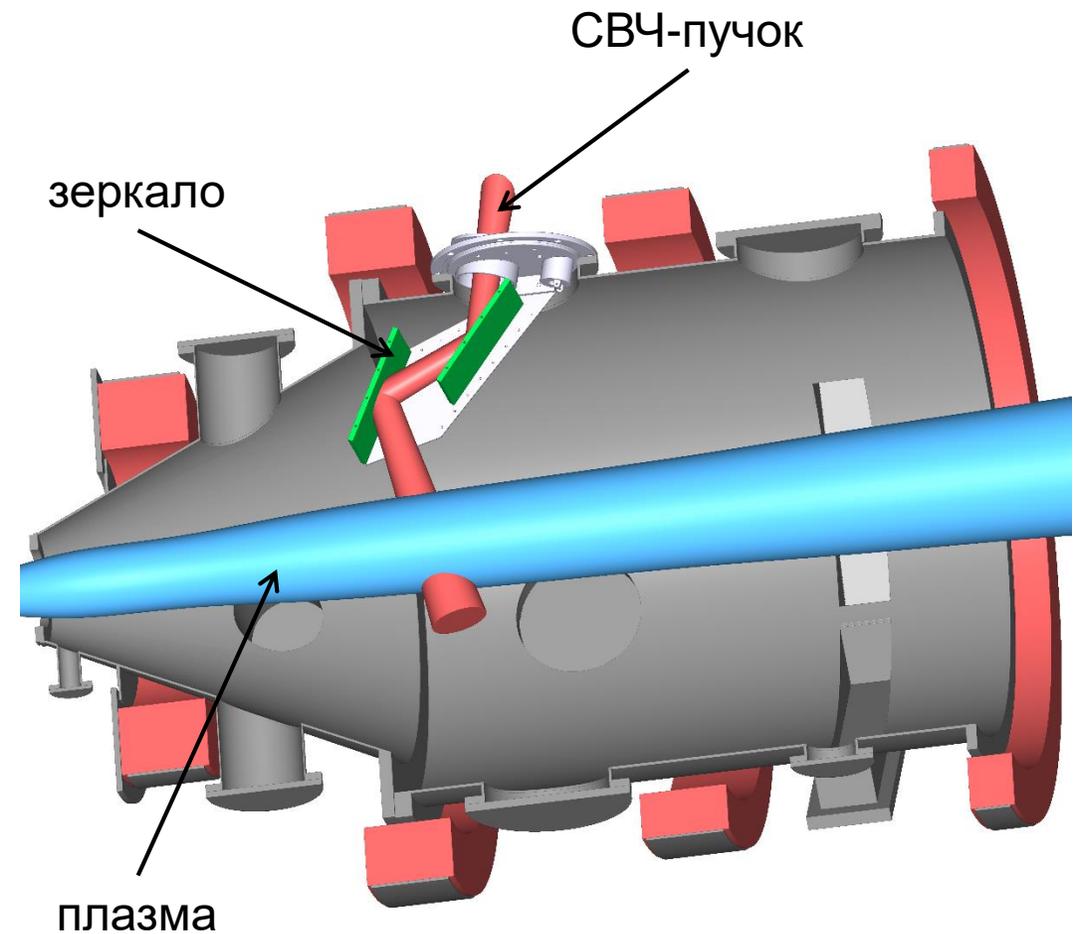
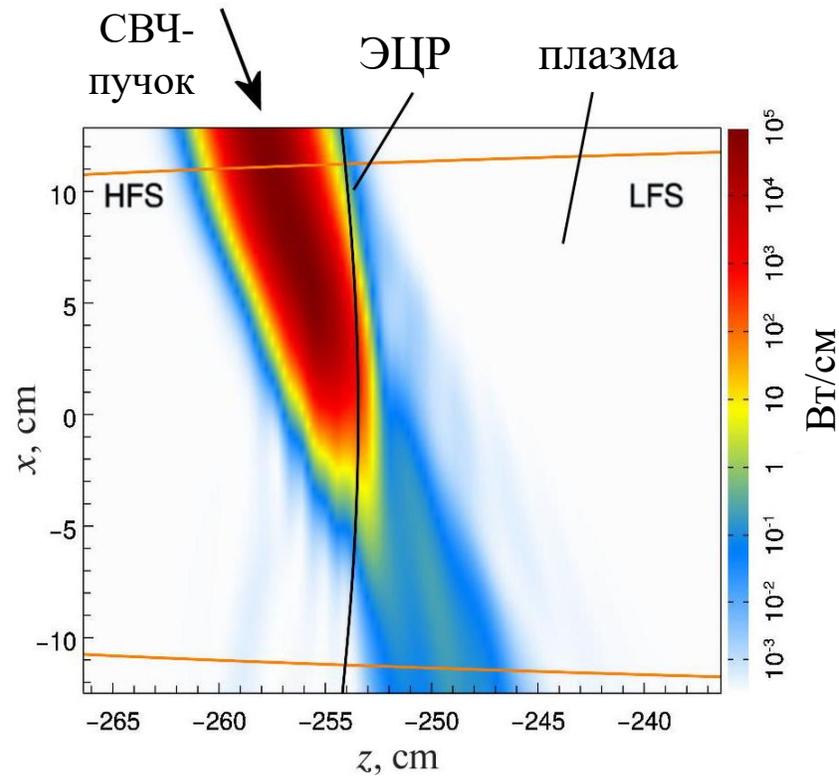
В экспериментах с СВЧ-нагревом плазмы на второй гармонике ЭЦР получен профиль электронной температуры более широкий, чем при нагреве на первой гармонике ЭЦР в 2018 году.

Устойчивость плазмы при СВЧ нагреве

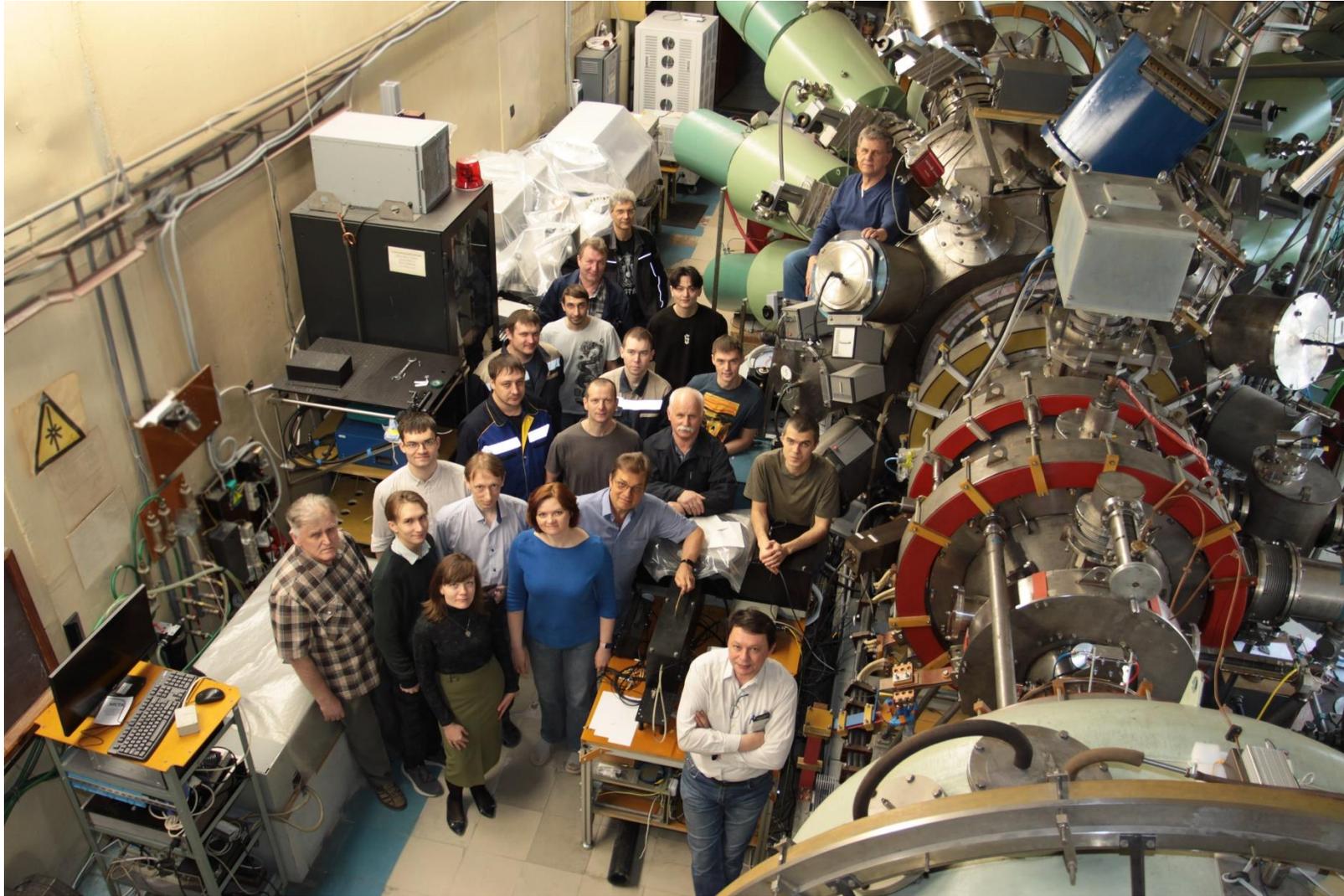


При СВЧ-нагреве плазмы на второй гармонике ЭЦР возможно получить устойчивое удержание плазмы без дополнительной стабилизации. При развитии неустойчивости наблюдается сброс температуры с пиковых значений и ее последующий рост.

Дальнейшие планы



Согласно моделированию, при вводе излучения со стороны сильного магнитного поля около 95% мощности пучка поглощается плазмой без отражения. В настоящее время ведется монтаж узла ввода для реализации такой конфигурации.



Благодарю за внимание!