

Развитие установок комплекса ГОЛ-3

А.В.Бурдаков

от имени команды

Введение

ГОЛ-3 развивается...

Установки комплекса ГОЛ-3 сегодня

- ❖ **Мощные электронные генераторы У-2 и У-3 и установки ГОЛ-3Т и ЭЛМИ**
Коллективное взаимодействие пучков с плазмой, генерация электромагнитного излучения
А.В.Аржанников, С.Л.Синицкий
- ❖ **Установка ВЕТА и станция СИ «Плазма»**
Взаимодействие плазмы с поверхностью
Л.Н.Вячеславов, А.С.Аракчеев
- ❖ **ГОЛ-НВ**
Многопробочная ловушка
В.В.Поступаев
- ❖ **СМОЛА**
Удержание плазмы в спиральном магнитном поле
А.В.Судников
- ❖ **ИТЭР**
(0.3 %-вклад ИЯФ)
М.В.Иванцевский

Проект ГДМЛ

(Газодинамическая Многопробочная Ловушка)

Инфраструктурный комплекс разработки новых технологий удержания термоядерной плазмы

Из проекта национальной программы «Развитие управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий на период 2019-2025 годов и на перспективу до 2035 года»:

Ожидаемый результат:

экспериментальное обоснование параметров и скейлингов эффективных режимов удержания плазмы в линейных ловушках для проектов энергетического термоядерного реактора и нейтронного источника;

Проект ГДМЛ подразумевает развитие существующих и строительство новых установок

ИТЭР

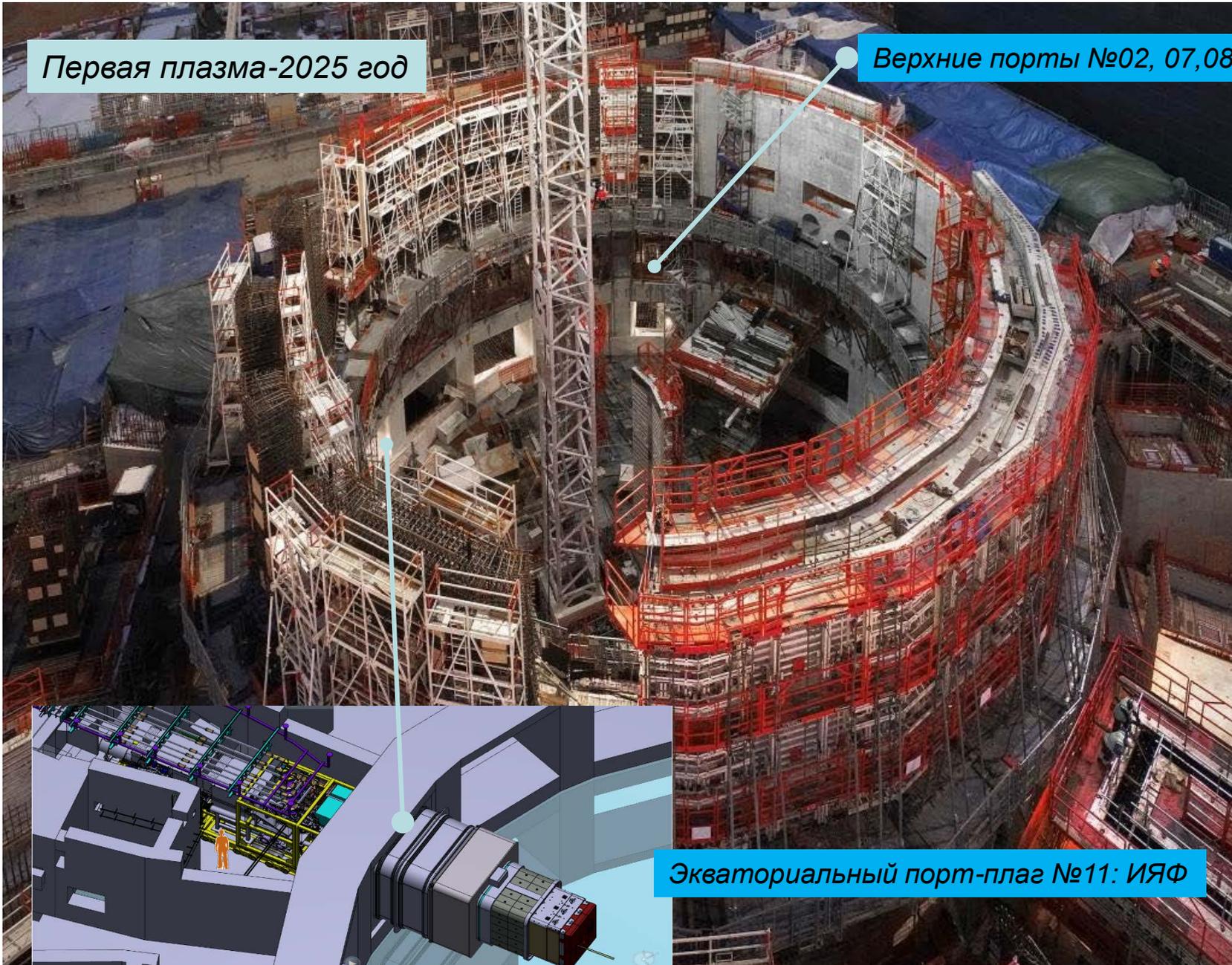
ИТЭР строится по графику



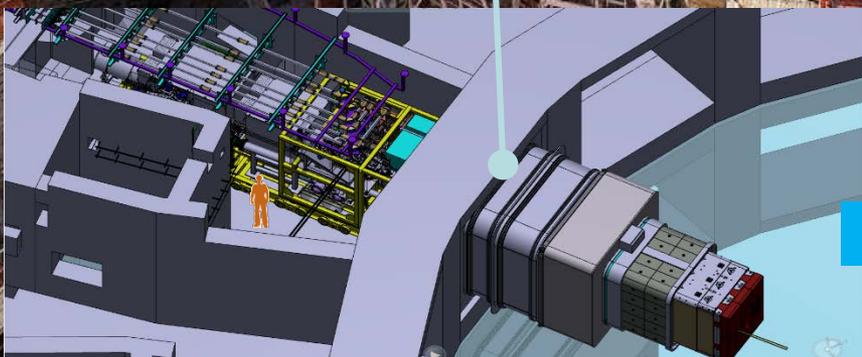
ИЯФ для ИТЭР

Первая плазма-2025 год

Верхние порты №02, 07,08 ИЯФ



Экваториальный порт-плаг №11: ИЯФ



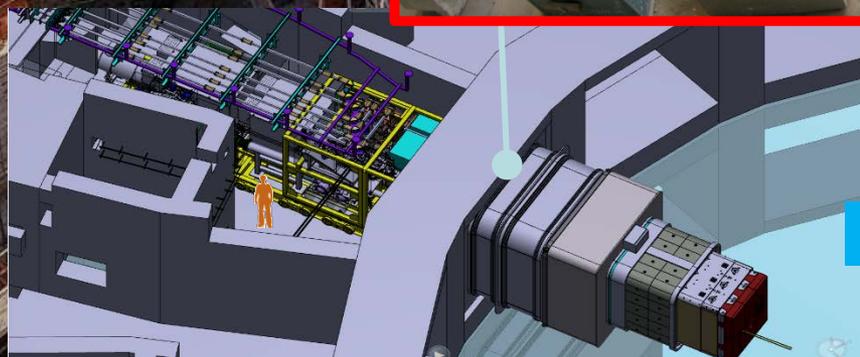
ИЯФ для ИТЭР

Первая плазма-2025 год

Верхние порты №02, 07,08 ИЯФ

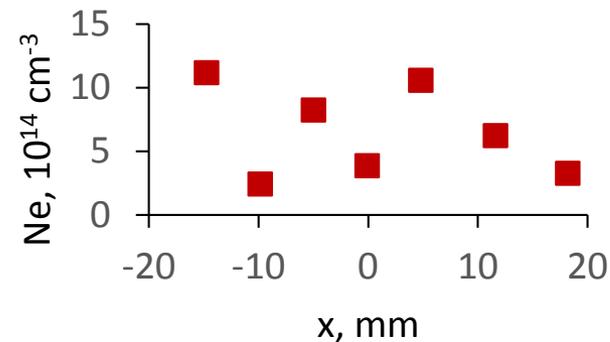
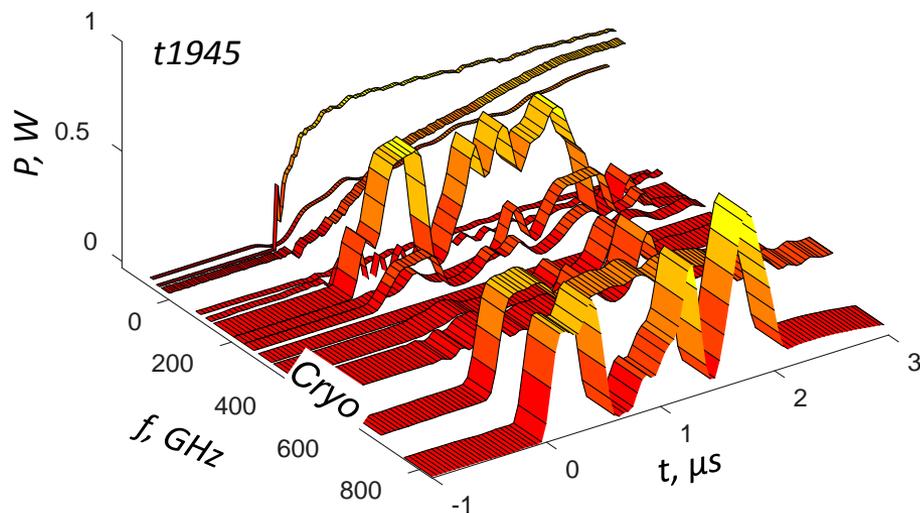
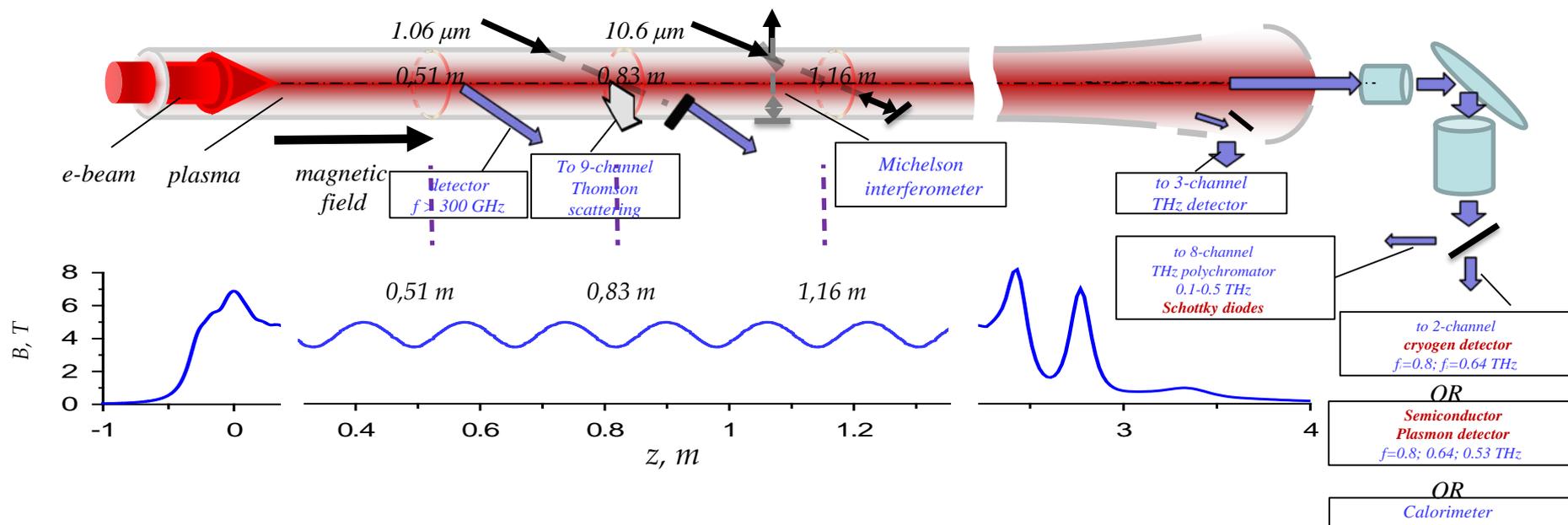


Сборочная площадка порт-плагов в ИЯФ
В 2018 году нужно сделать площадку чистой



Экваториальный порт-плаг №11: ИЯФ

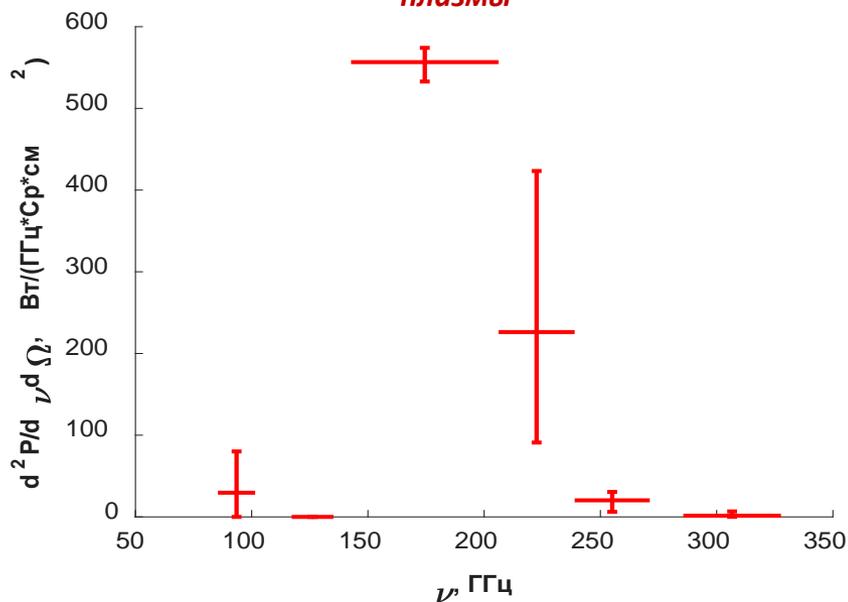
Схема экспериментов на установке ГОЛ-3Т в 2016 – 2017 годах



$\langle n_e \rangle \approx 0,7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 $\nabla n_e \approx 10^{15} \text{ cm}^{-4}$

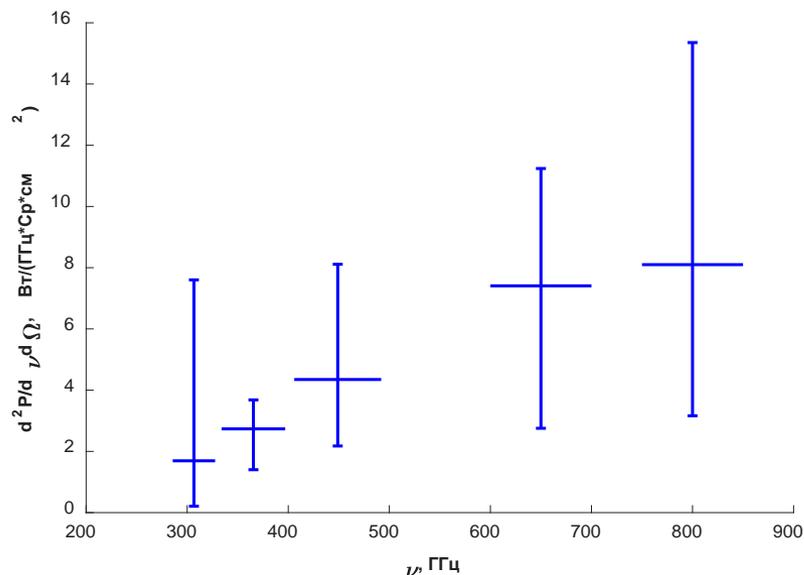
Эмиссия терагерцового излучения вдоль магнитного поля при релаксации РЭП в плазме с высоким градиентом плотности

Спектр эмиссии, которая вызвана прямой конверсией верхнегибридных колебаний на градиентах плотности плазмы



Удельная мощность излучения в окрестности верхнегибридной частоты
25 кВт/(ср·см²)

Спектр эмиссии, обусловленной слиянием двух верхнегибридных колебаний



Удельная мощность излучения в области удвоенной частоты верхнегибридных колебаний
3 кВт/(ср·см²)

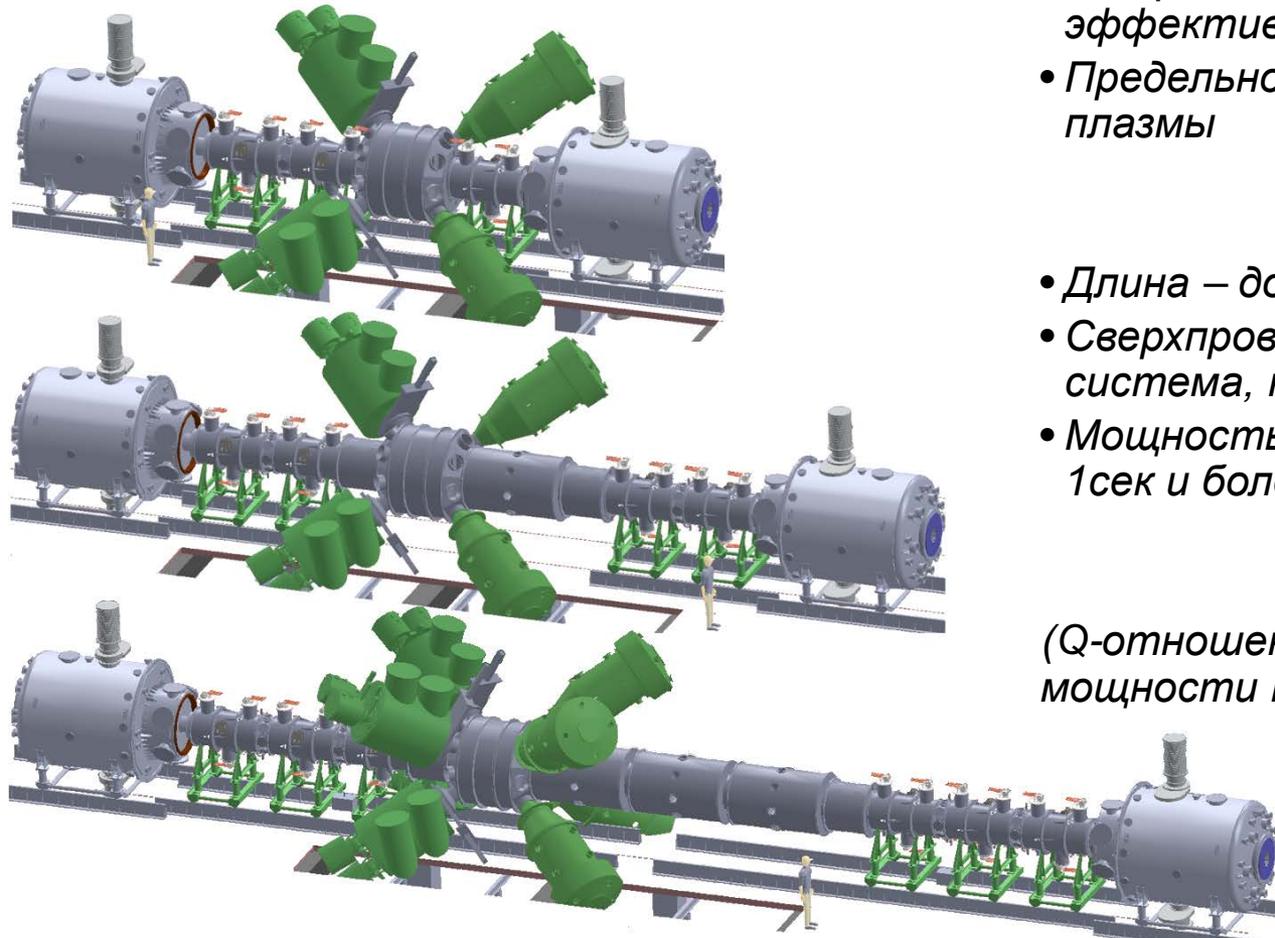
Проект ГДМЛ

Цель- экологически привлекательный (без трития) термоядерный реактор

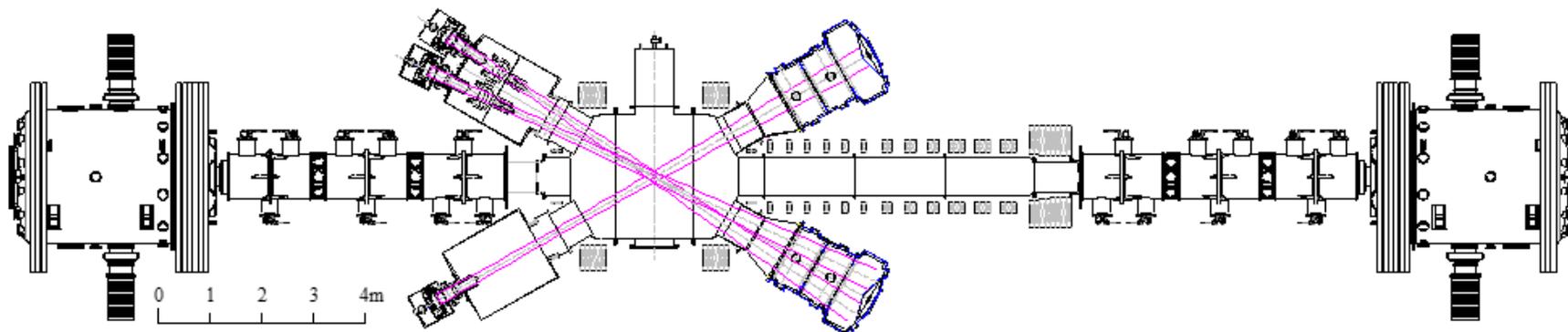
- Суб-термоядерные параметры в водородной плазме с эффективностью удержания $Q > 0.1$
- Предельно высокое давление плазмы

- Длина – до 30 м;
- Сверхпроводящая магнитная система, на поле от 3 -13Тл;
- Мощность до 30МВт в импульсах 1сек и более.

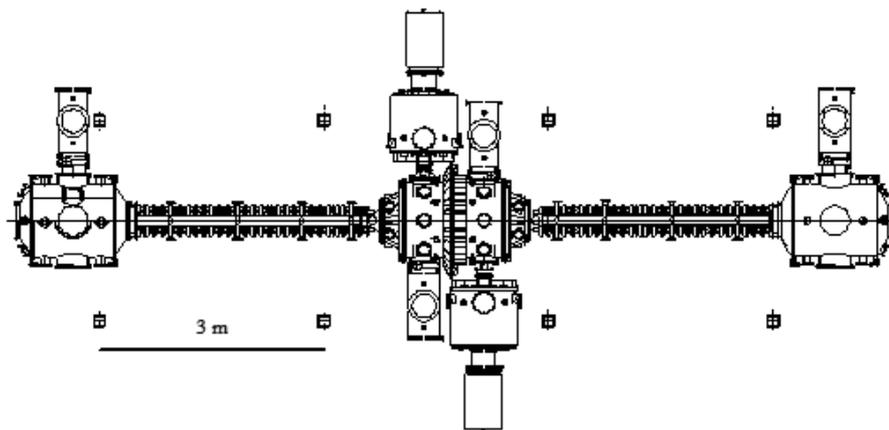
(Q -отношение термоядерной (экв.) мощности ко вложенной)



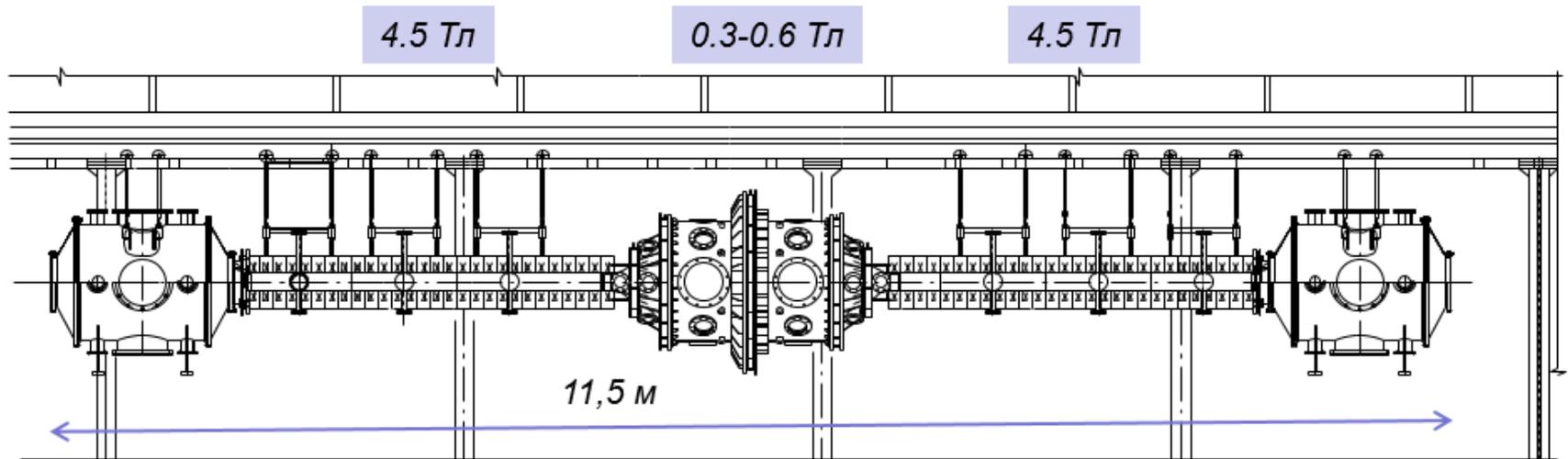
Проект ГДМЛ



Установка ГОЛ-НВ-пробирка ГДМЛ



В 3 раза короче,
импульсная



Основная цель создания установки

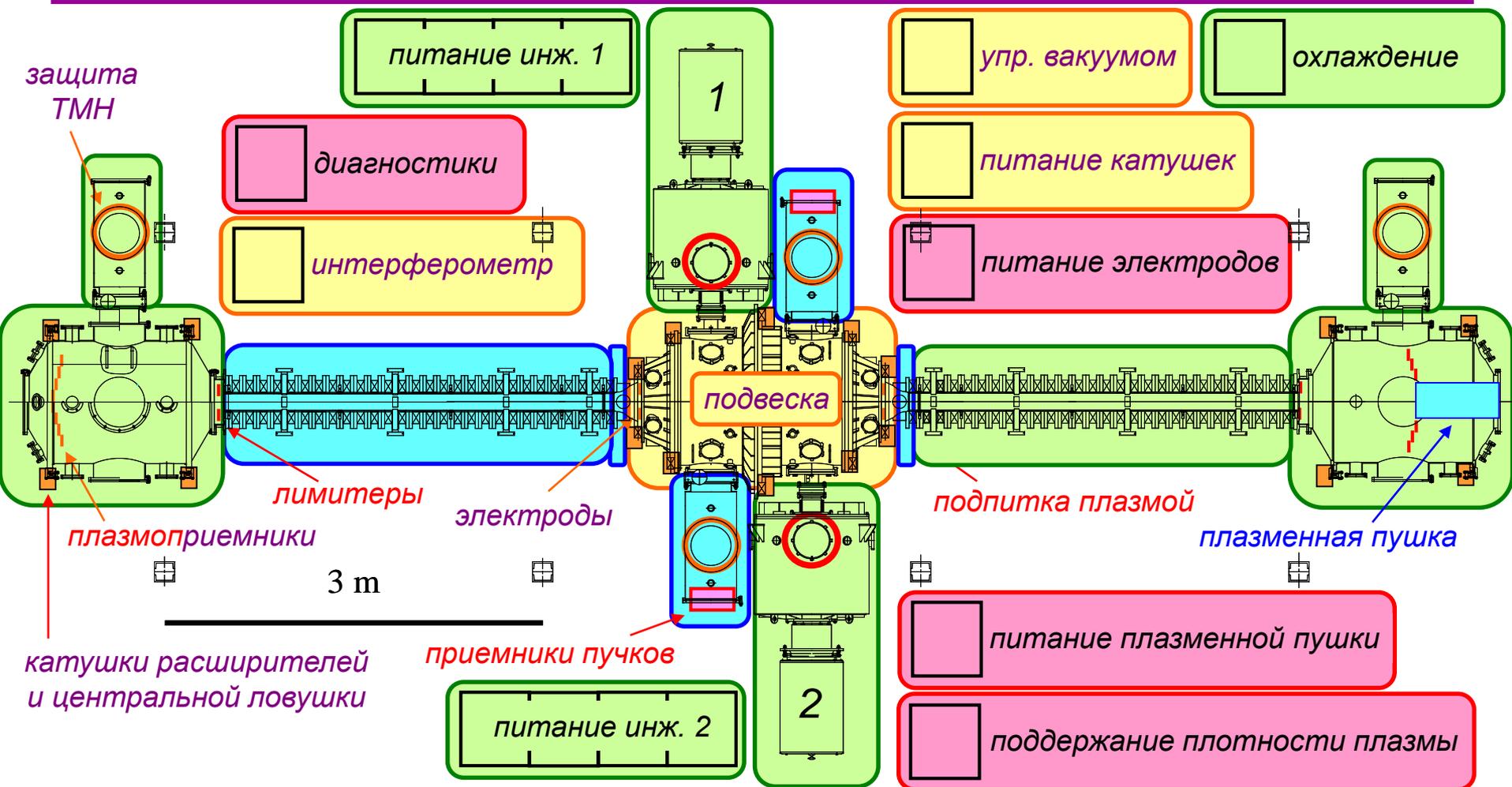
Прямо и наглядно продемонстрировать, что качество удержания плазмы в установках типа ГДЛ и ГДМЛ может быть существенно улучшено (то есть получены более высокие параметры плазмы) при добавлении в магнитную структуру секций с многопробочным магнитным полем.

Нагрев плазмы: нейтральная инжекция 2×0.75 МВт при энергии 25 кэВ

Параметры плазмы (базовый сценарий): плотность $3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$

температура от **30** эВ (режим ГДЛ) до **100** эВ (при многопробочном удержании)

Начало проектирования: осень 2014 г.



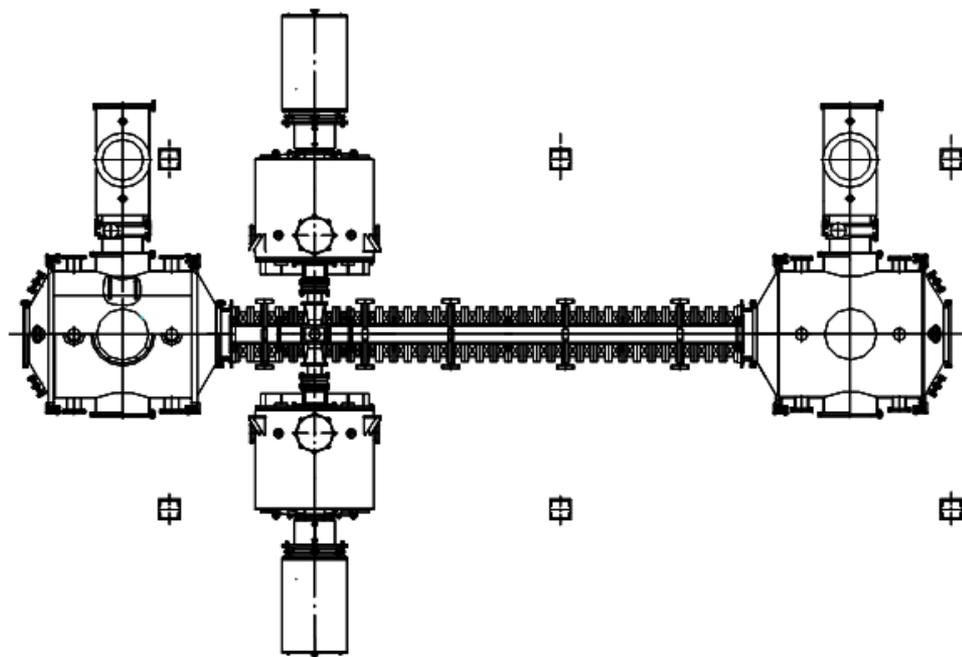
Состояние дел (цвет):

- готово
- подготовлено к монтажу
- в производстве/наладке
- ожидает конструирования

Состояние дел (производство на 07.02.2018):

- сдано заказов: 31 / 23.6 тыс. н/ч
- из них выполнено: 23 / 12.1 тыс. н/ч
- в производстве: 7+1 / 11.5 тыс. н/ч (остаток 5 тыс.)
- очередь на конструирование: 29 работ

без центральной ловушки



0 0,5 1 1,5 2 м



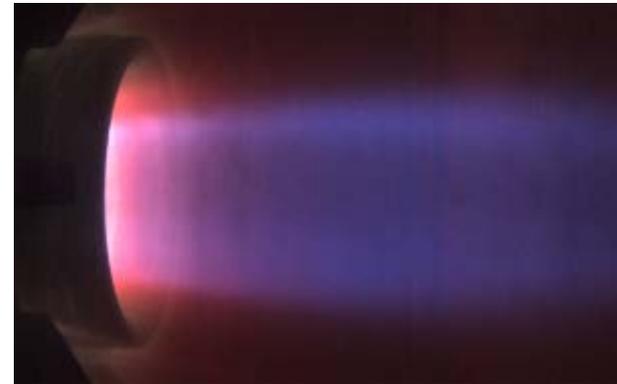
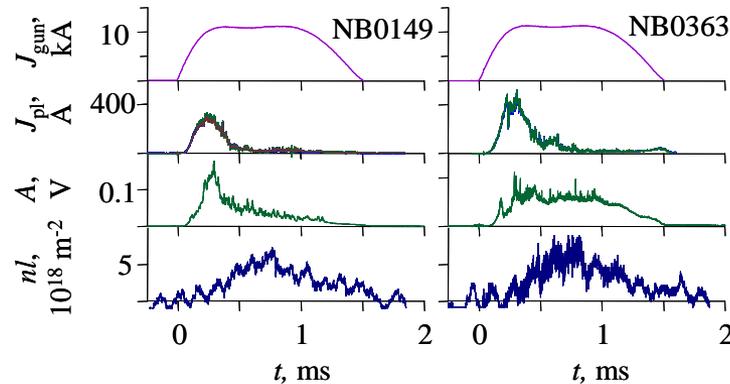
20.07.2017

1. Транспортировка плазменной струи через многопроходную систему

Задача: холодная плазма должна свободно проходить через многопроходное поле.

Теория: начало 1970-х гг. Прямой эксперимент: отсутствовал до 2017 !

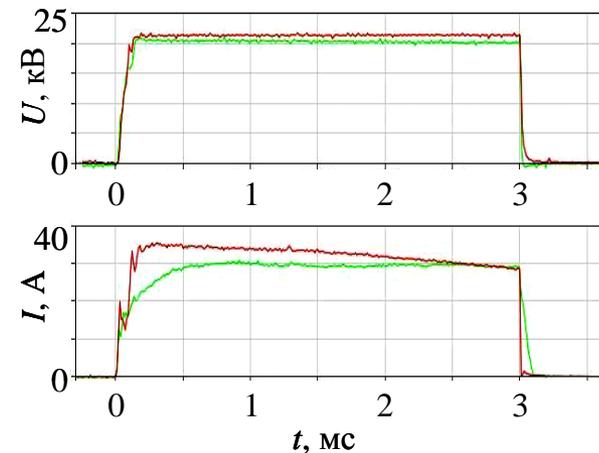
I. A. Ivanov, et al., AIP Advances 7, 125121 (2017)



2. Отработка системы нейтральной инжекции для нагрева плазмы (1,5 МВт)

Ведётся отладка двух инжекторов со штатными системами питания и управления.

Инжекторы подключены к временной секции вакуумной камеры.

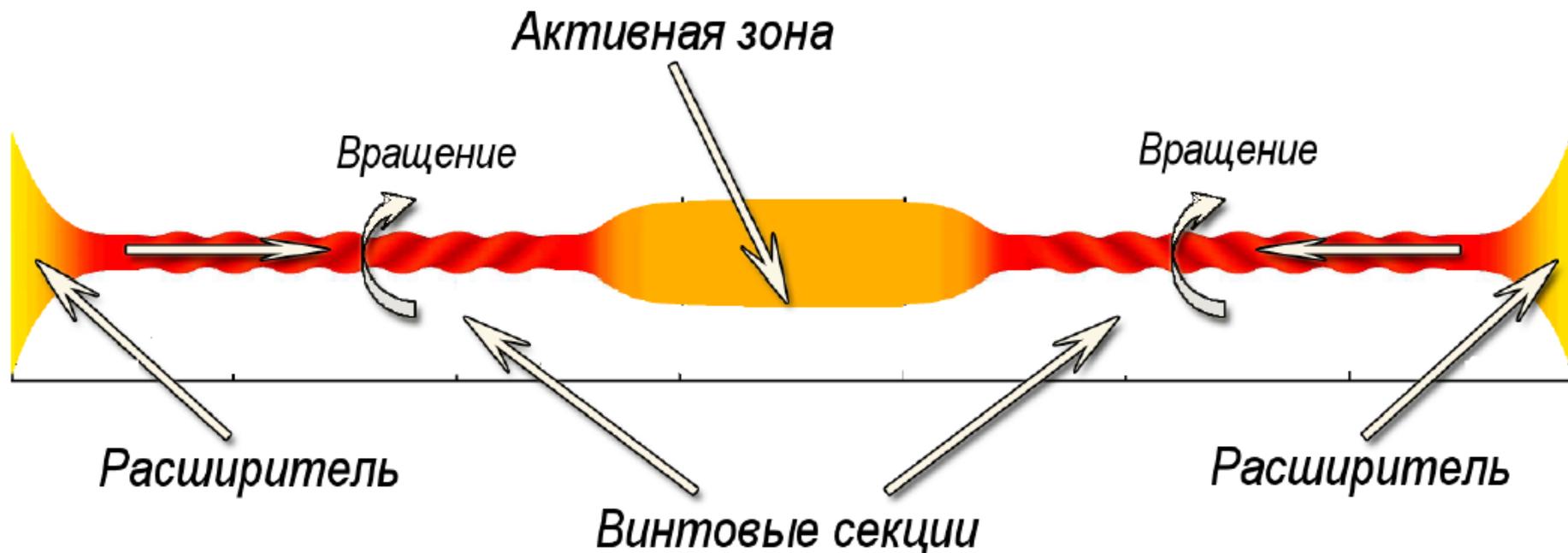




Программа работ на ГОЛ-НВ

- Запуск стартовой конфигурации и первая плазма в 2018 г.
- Исследования по программе ГОЛ-НВ внесены в проект Термоядерной программы России в качестве эксперимента, развивающего физику и технологию для открытой ловушки реакторного класса:
 - демонстрация подавления потерь частиц и энергии из ловушки при включении секций с многопробочным магнитным полем;
 - независимое подтверждение физических и технических идей программы ГДЛ;
 - развитие методов дополнительного нагрева плазмы для достижения более высоких параметров;
 - поиск способов управления длиной свободного пробега частиц для увеличения эффективности удержания в области высоких температур;
 - исследование новых магнитных конфигураций многопробочных секций.
- Конечная цель работ: создание технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса.

Винтовая ловушка



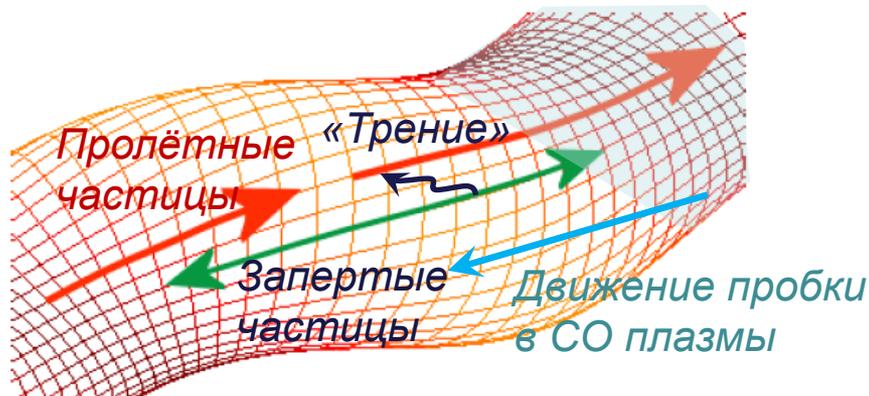
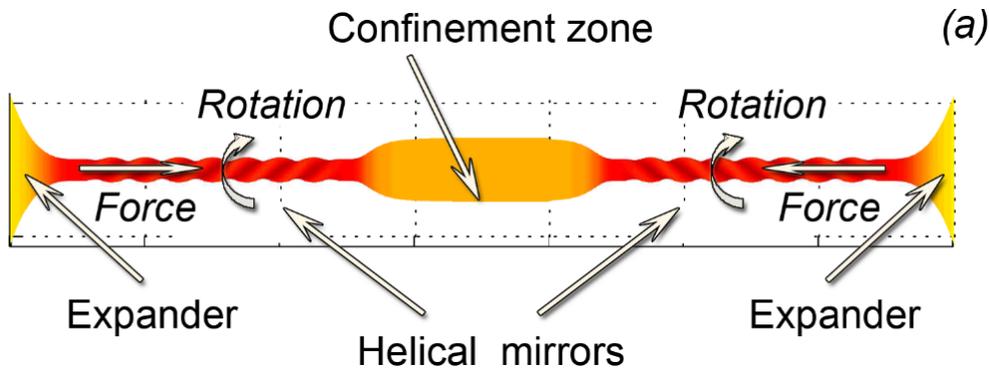
Идея: шнековый насос

“Перистальтическое” перекачивание плазмы создаётся за счёт её вращения в магнитном поле с винтовой гофрировкой (которая во вращающейся системе отсчёта выглядит как бегущая.)

A. D. Beklemishev. *Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps* // *Fusion Science and Technology*, V.63, N.1T, May 2013. P.355

А. Д. Беклемишев. Семинары от 29.11.2016, 05.12.2016

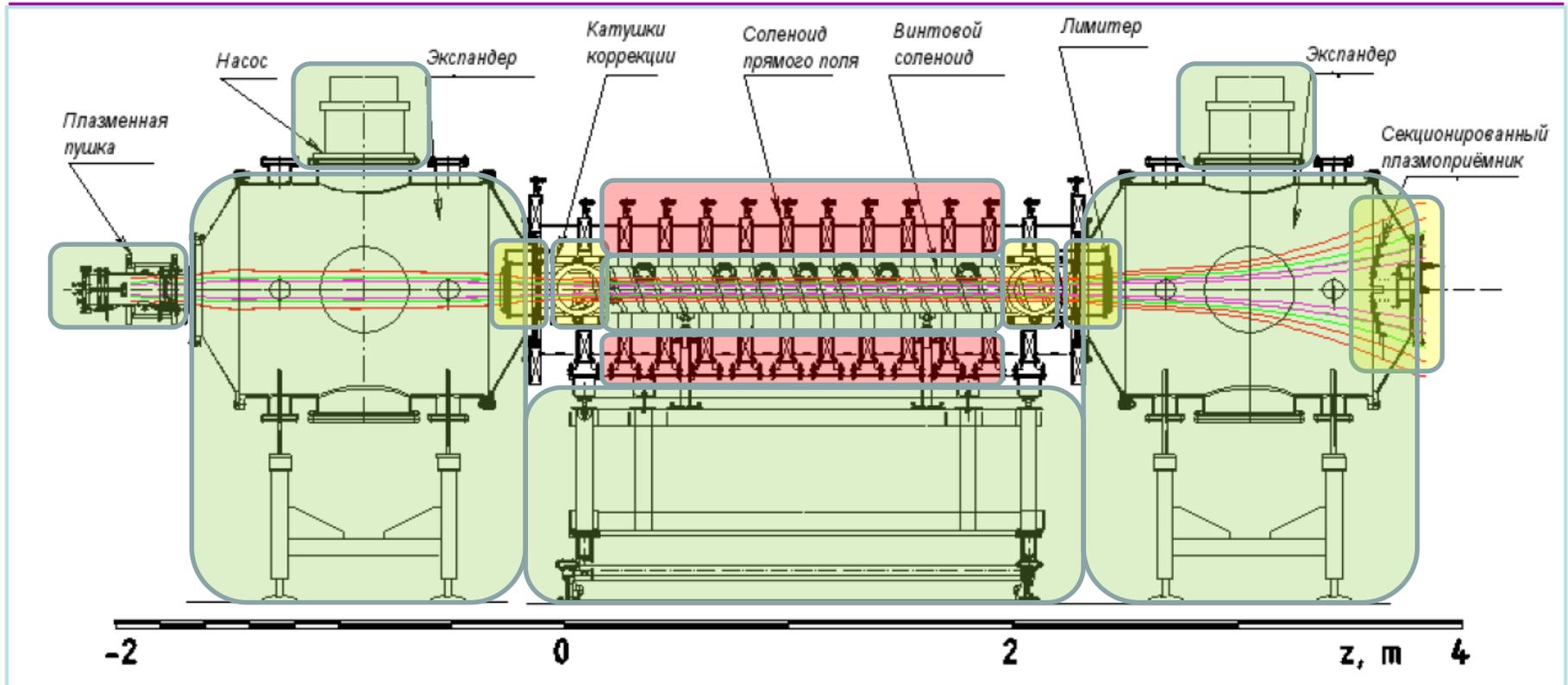
Винтовое удержание. Установка «СМОЛА»



Пробкотрон: $\tau_E \sim L$
 Многопробочная ловушка: $\tau_E \sim L^2$
 Винтовая ловушка: $\tau_E \sim \exp(L) ?$

- Магнитное поле с винтовой симметрией. Продольная и радиальная компоненты сравнимы
- Есть гофрировка вдоль каждой силовой линии
- Пробка движется в системе отсчёта вращающейся плазмы
- Передача импульса: пробка → запертые частицы → пролётные частицы
- ГДМЛ с винтовыми пробками может оказаться эффективнее многопробочного
- Радиальный перенос-по электрическому полю, т.е к центру=пинчевание, которое противостоит диффузии

«СМОЛА»



Цель- проверка принципа винтового удержания

Основные узлы установки готовы (использовалось в серии экспериментов, монтируется, в производстве).

$$n_i \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$$

$$B_z = 0.05 \text{ Т}$$

$$B_{z,max} = 0.1 - 0.3 \text{ Т}$$

$$E_r \sim 10 - 100 \text{ В/см}$$

$$\tau \sim 0.1 \text{ с}$$

$$r \sim 5 \text{ см}$$

$$h = 18 \text{ см}$$

$$N = 12$$

$$R_{mean} \sim 1.5 - 2$$

Внешний вид установки

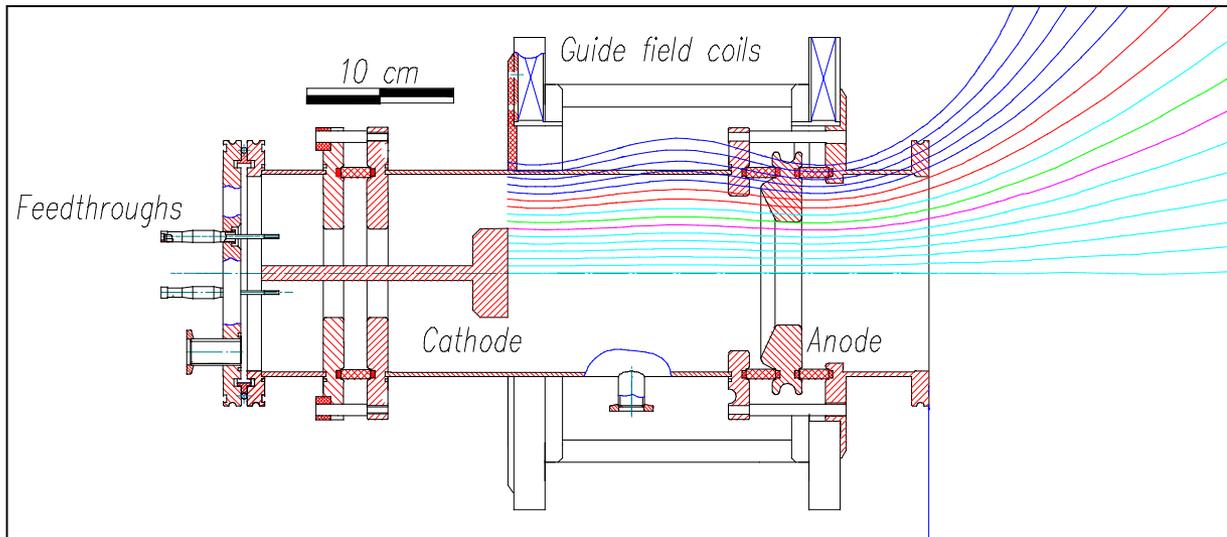


2017.01.25

Внешний вид установки



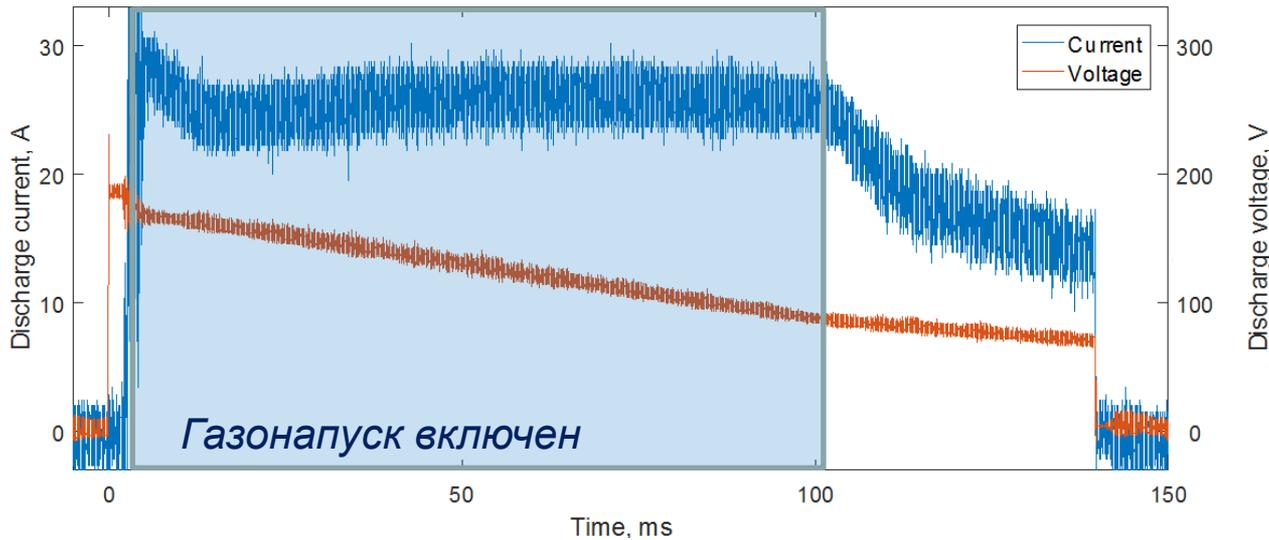
Источник плазмы



Катод (LaB_6) магнитно изолирован от анода.

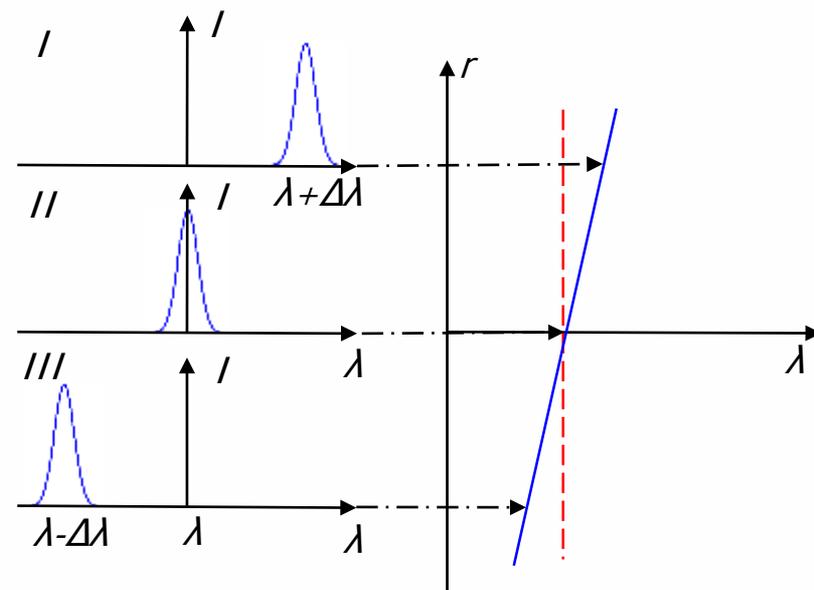
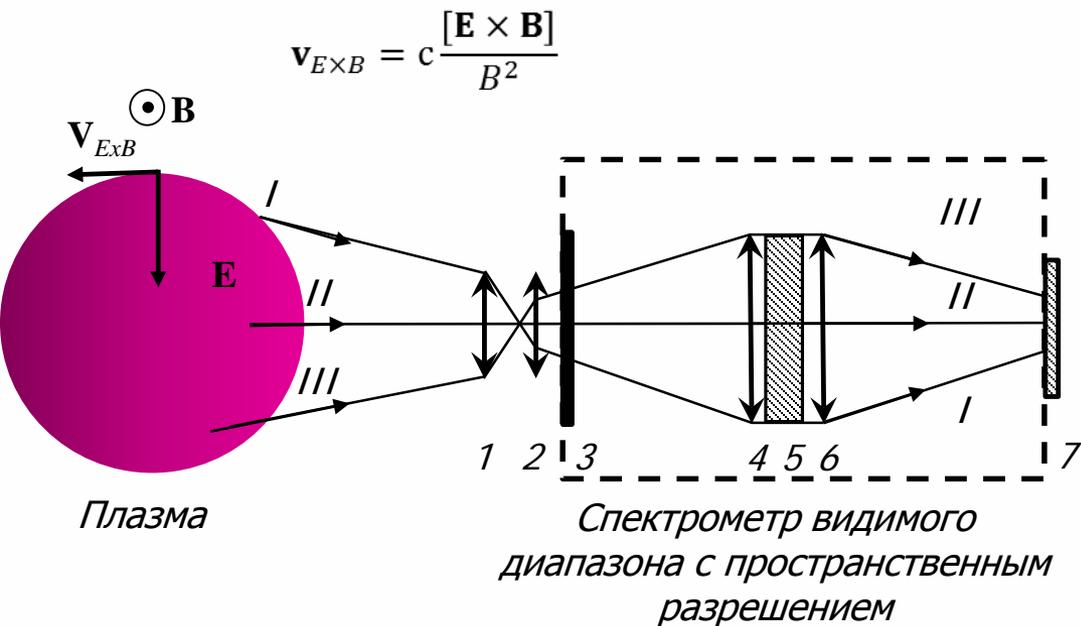
Цветом выделены силовые линии, исходящие из катода, анода, заземлённой стенки.

Длительность разряда (на сегодня — 0.1–0.3 с) соответствует проектной.



Диагностика вращения

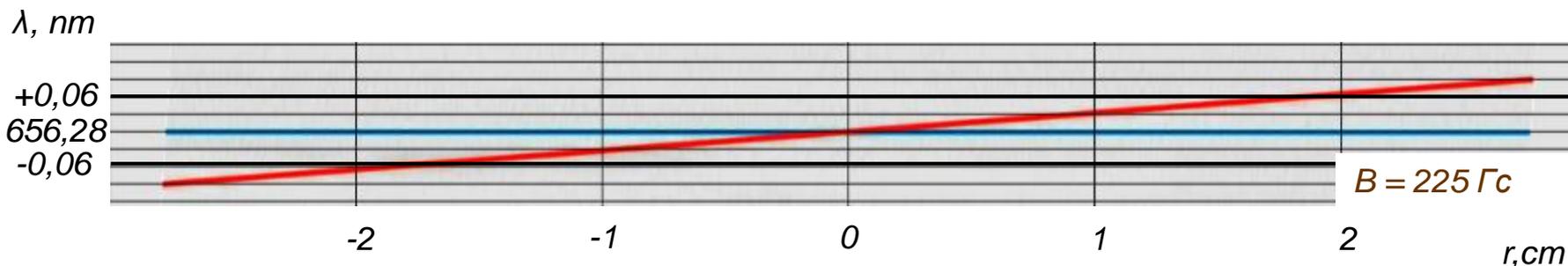
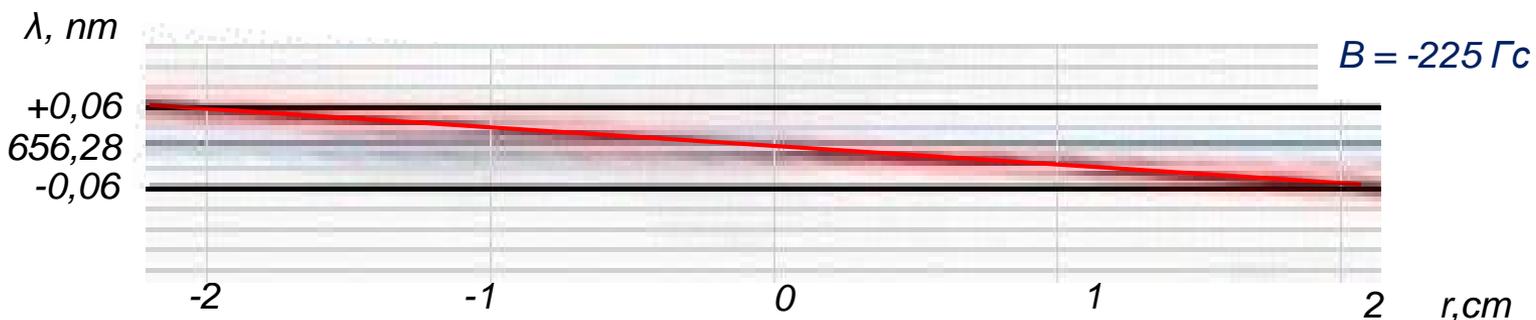
доплеровский сдвиг линии $H\alpha$



- 1 – Объектив
- 2 – Линза
- 3 – Входная щель
- 4, 6 – Параболические зеркала
- 5 – Дифракционная решетка
- 7 – ПЗС - камера

Меняя направление магнитного поля \mathbf{B} можно изменить направление вращения плазмы

Диагностика вращения

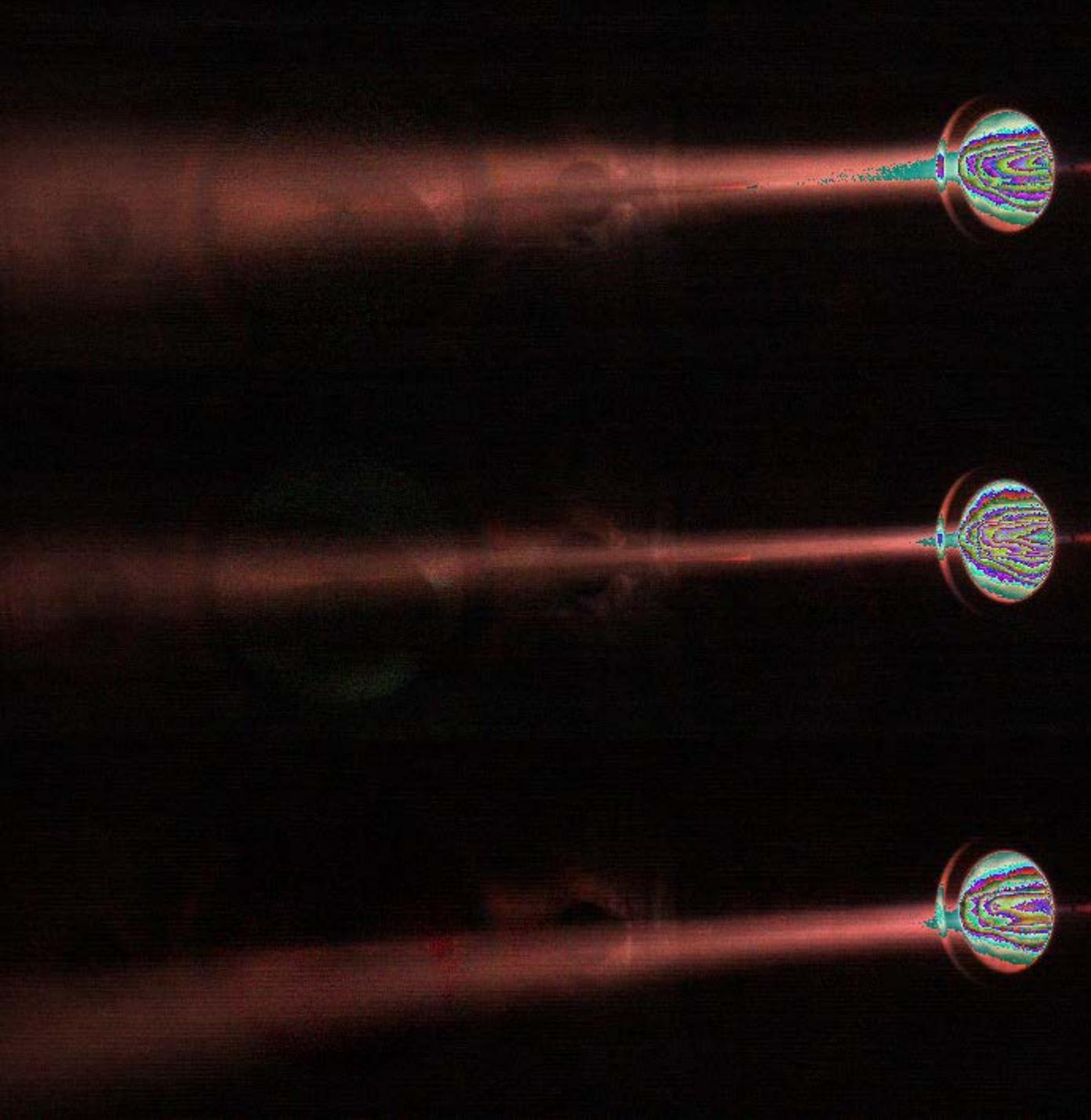


Величина доплеровского сдвига линии Na ($z = 150$ см). Изменение знака магнитного поля отвечает изменению направления вектора \mathbf{V} во всём объёме при сохранении магнитной конфигурации.

Вращение при $B < 0$ соответствует режиму **удержания**, $B > 0$ — **ускорения**.

Направление вращения соответствует $\mathbf{E} \sim 10$ В/см, направленному от периферии к оси. Скорость вращения при $r = 2$ см составляет

$$\frac{v}{c} \sim \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 0.9 \cdot 10^{-4} \quad v_{E \times B} \sim 2.7 \cdot 10^6 \text{ cm/s} \quad \omega \sim 2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} \quad v_z \sim 3.9 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$$



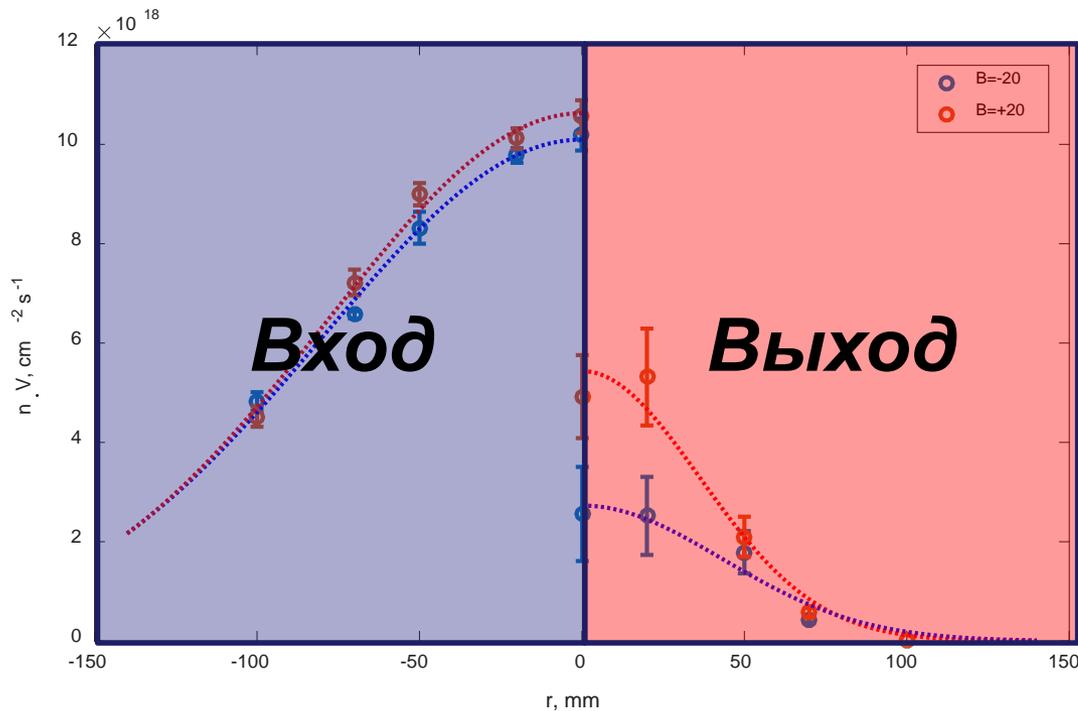
За винтовой пробкой
 $Z = 490$ см
Без винтового поля
Ширина профиля 50 а.е.

За винтовой пробкой
 $Z = 490$ см
Режим удержания
Ширина профиля 35 а.е.

За винтовой пробкой
 $Z = 490$ см
Режим ускорения
Ширина профиля 40 а.е.

Есть пинч!?

Модификация профилей винтовым полем



Оранжевый — ускорение

Синий — удержание

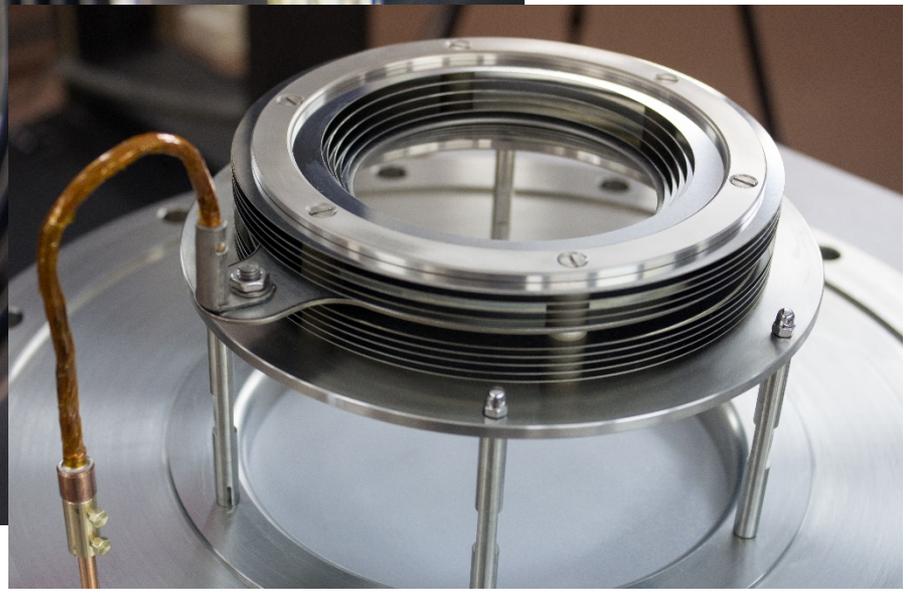
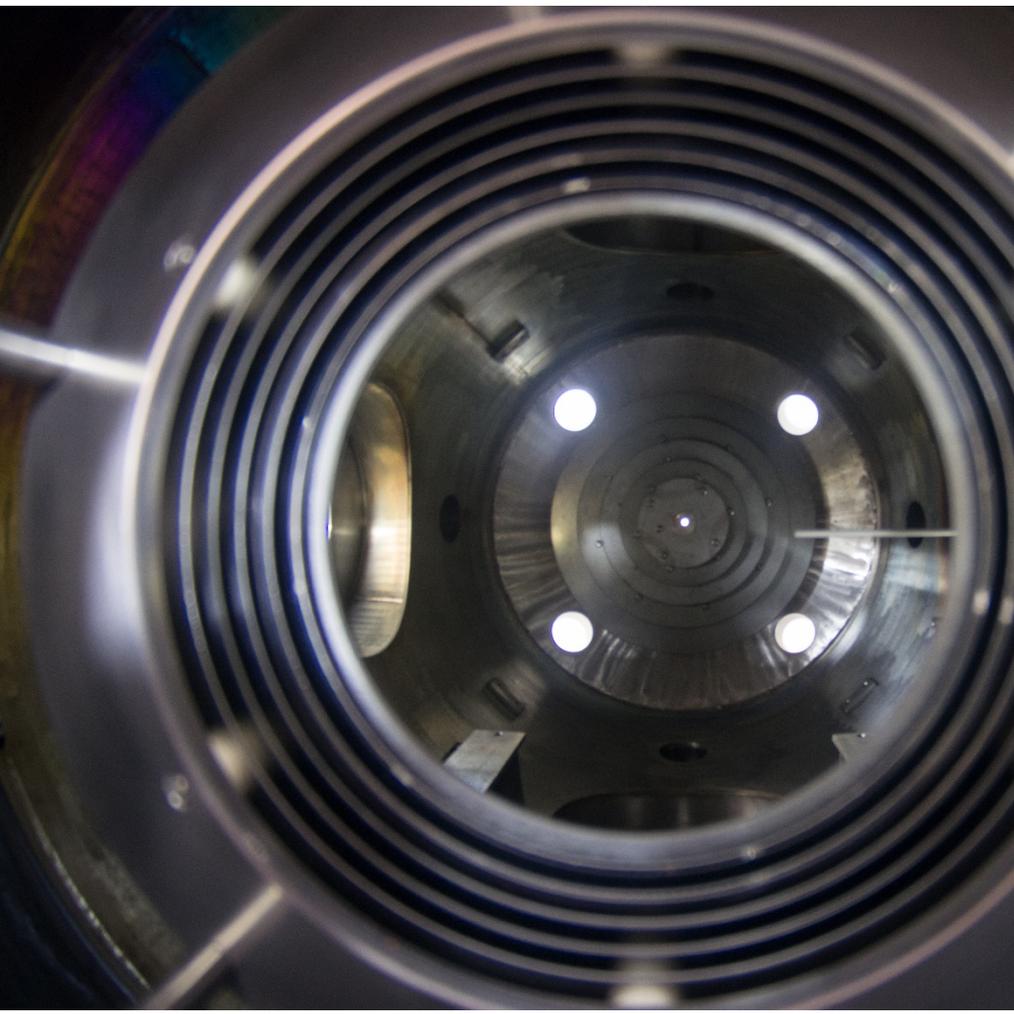
Ток насыщения зонда во входном (слева) и выходном (справа) расширителях при разных направлениях магнитного поля.

Профиль плазмы до винтовой пробки изменяется (в текущей конфигурации) слабо.

Поток плазмы после винтовой пробки (в текущей конфигурации) в режиме удержания в ~2 раза меньше, чем в режиме ускорения.

Следующий шаг на СМОЛе

Управление электрическим полем



Результаты

- *На установке СМОЛА начаты эксперименты по проверке концепции винтового удержания.*
- *Эффект винтового удержания есть.*
- *Дальнейшая задача — определение эффективности и поиск оптимальных режимов.*

Заключение

- *На установках комплекса ГОЛ-3 ведутся эксперименты и идет строительство новых установок*
- *На винтовой ловушке СМОЛА зарегистрирован эффект винтового удержания.*
- *ГОЛ-NB становится пусковым объектом*
- *Нас ждет интересная физика и продвижение проекта ГДМЛ*

Спасибо за внимание!