

# Многопробочное удержание плазмы в ИЯФ СО РАН

Д.И. Сквородин

от имени команды

# Введение

---

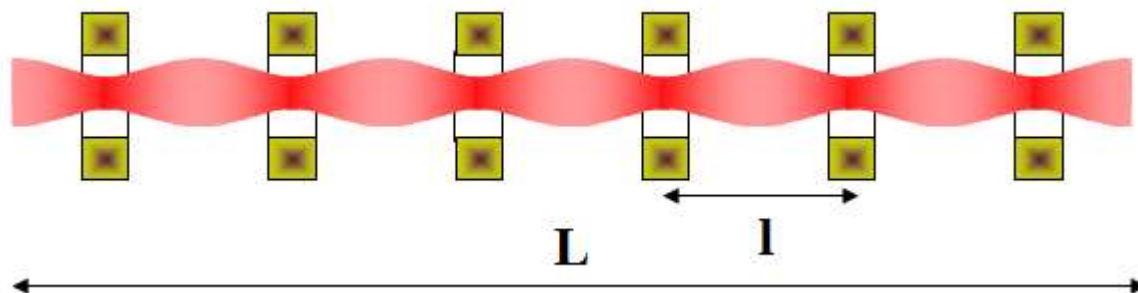
## План доклада:

- ❖ Введение.
- ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
- ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Заключение.

# Введение

Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д. // Письма в ЖЭТФ, 1971, 14, 320.

Logan B. G., et al. // Phys. Rev. Lett., 1972, 28, 144.



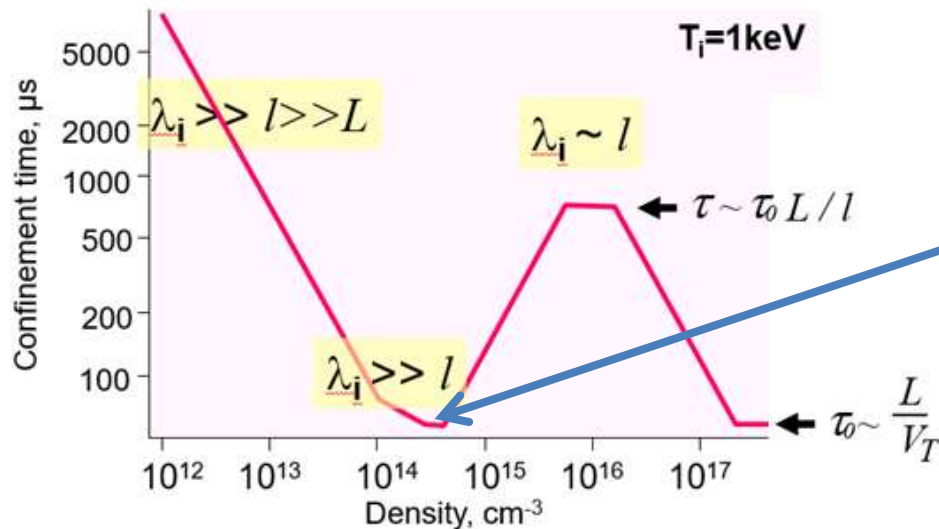
- Если длина свободного пробега иона  $\lambda_i$  меньше, чем длина ловушки  $L$ , но больше, чем масштаб гофрировки  $l$ , течение плазмы становится диффузионным.
- В термоядерном диапазоне температур парные кулоновские столкновения обеспечивают требуемый темп рассеяния при крайне высокой плотности  $\sim 10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому первоначально концепция многопробочного реактора предполагала импульсный характер работы.
- В экспериментах на многопробочной ловушке ГОЛ-3 было обнаружено улучшенное удержание ионов при умеренной плотности (аномальное рассеяние ионов).

# Введение

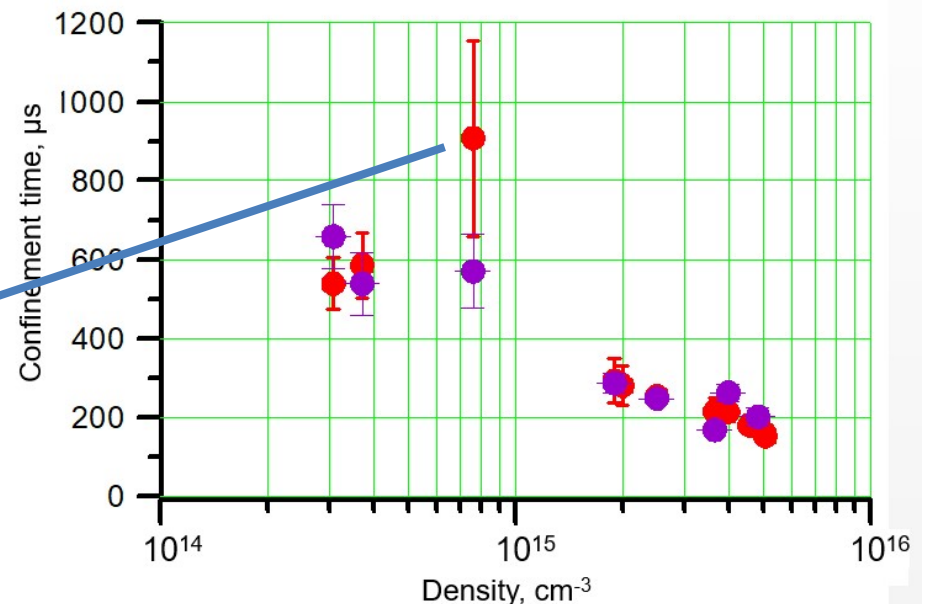


- Улучшенное удержание при умеренной плотности плазмы указывает на аномальное рассеяние ионов.
- Аномальное рассеяние ионов интерпретировано, как результат взаимодействия с коллективными колебаниями плазмы на частоте баунс-колебаний в ячейках гофрировки.

Установка ГОЛ-3 ( $T_e \approx 2-4$  кэВ,  $T_i \approx 2-3$  кэВ,  $\tau_E \approx 1$  мс,  $n \approx 10^{15}$  см $^{-3}$ ).



Расчетное время удержания в ГОЛ-3

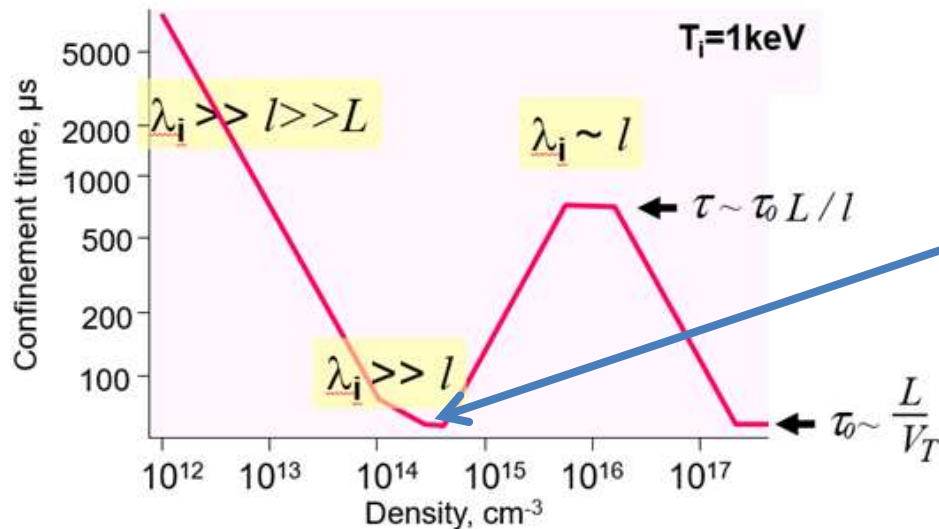


Измеренное время удержания в ГОЛ-3

# Введение

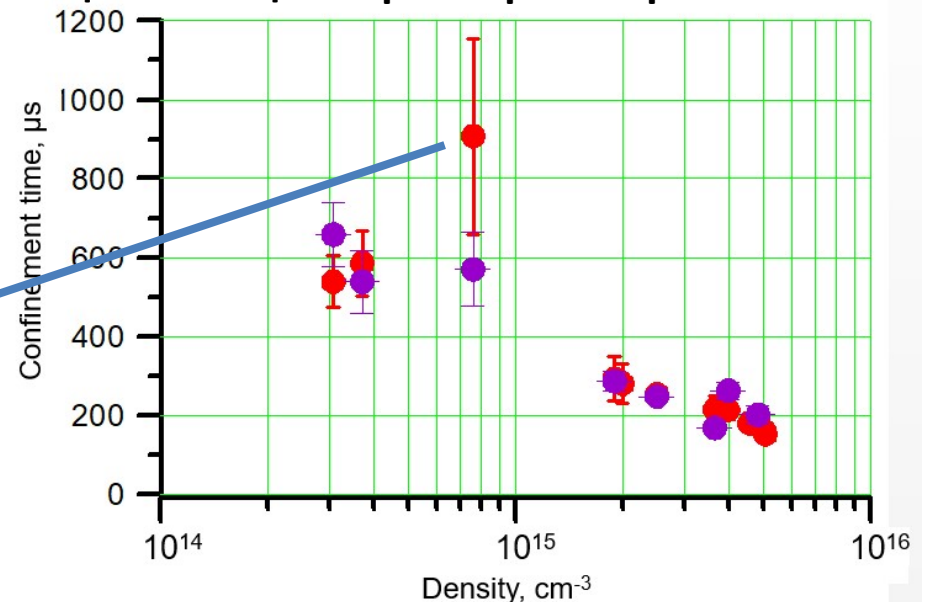


Установка ГОЛ-3 ( $T_e \approx 2-4$  кэВ,  $T_i \approx 2-3$  кэВ,  $\tau_E \approx 1$  мс,  $n \approx 10^{15}$  см $^{-3}$ ).



Расчетное время удержания в ГОЛ-3

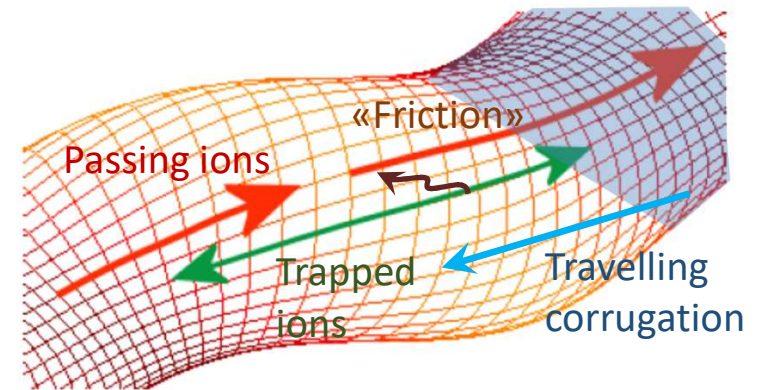
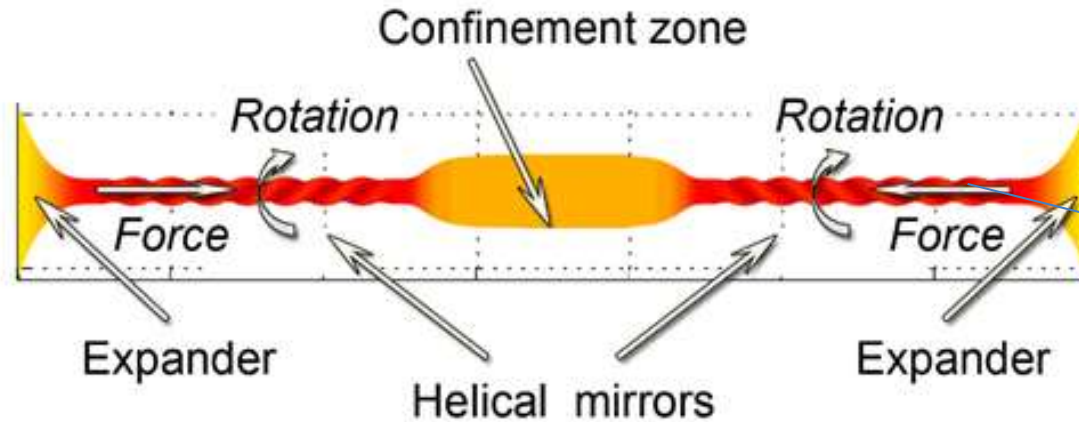
- Улучшенное удержание при умеренной плотности плазмы указывает на аномальное рассеяние ионов.
- Аномальное рассеяние ионов интерпретировано, как результат взаимодействия с коллективными колебаниями плазмы на частоте баунс-колебаний в ячейках гофрировки.
- **Аномальное рассеяние ионов открывает путь к использованию многопробочных секций в стационарном реакторе.**



Измеренное время удержания в ГОЛ-3

# Винтовая пробка

(новая разновидность многопробочного удержания)

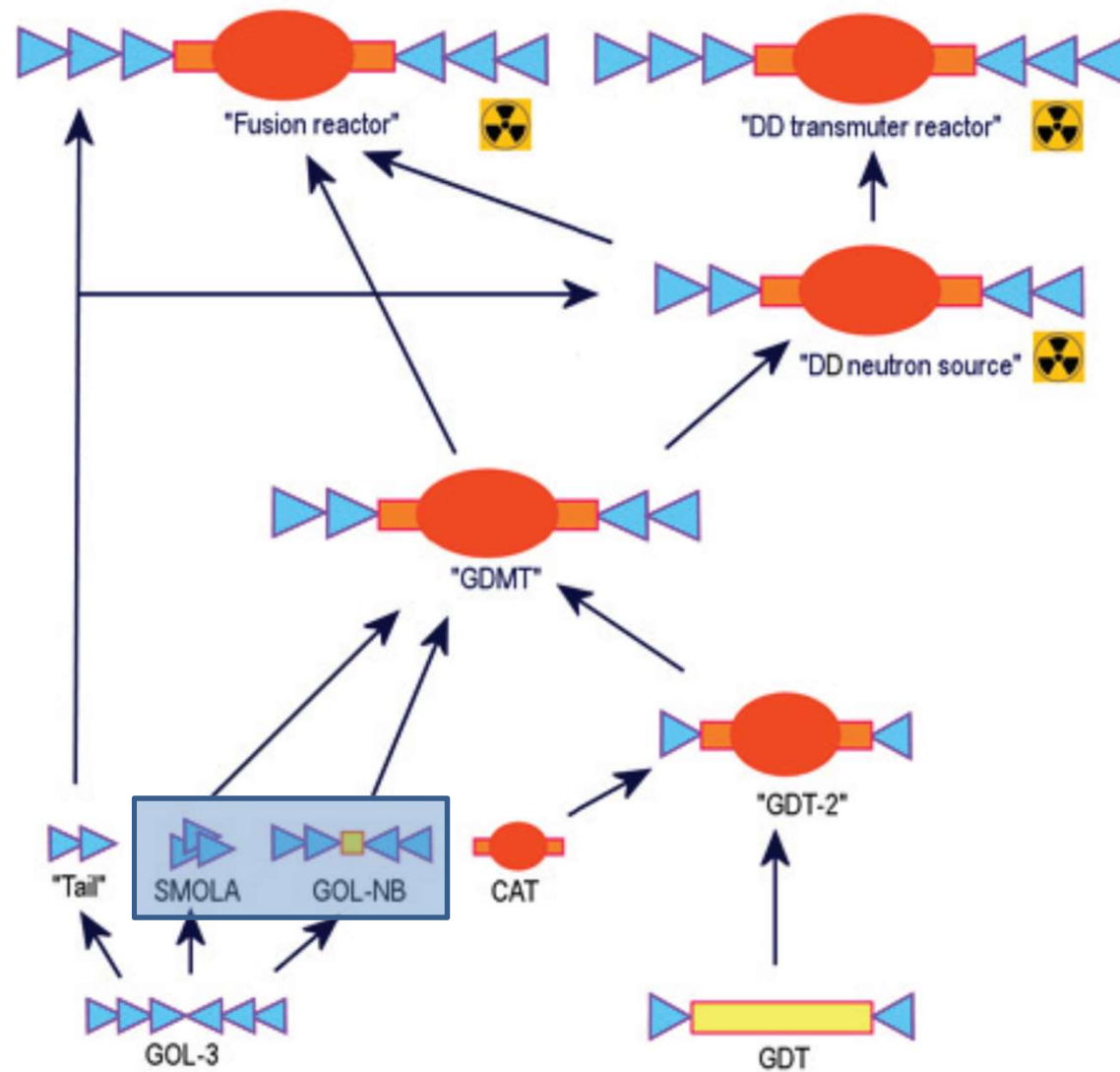


- Идея основана на вращении плазмы в геликоидальном магнитном поле.
- Во вращающейся системе отсчета плазма испытывает влияние бегущих пробок.
- Бегущие пробки передают импульс запертым между ними частицам. Трение между запертыми и пролетными частицами приводит к «перекачке» плазмы вдоль системы обратно в ловушку.
- Движение запертых частиц сопровождается радиальным дрейфом.

Преимущества:

- лучшее удержание;
- управление радиальными дрейфами;
- встречный поток запертых ионов может стимулировать аномальное рассеяние.

# Путь к реактору. Дорожная карта ИЯФ



- Винтовая ловушка **СМОЛА** (2017).
- Многопробочная ловушка **ГОЛ-НВ** (2021).

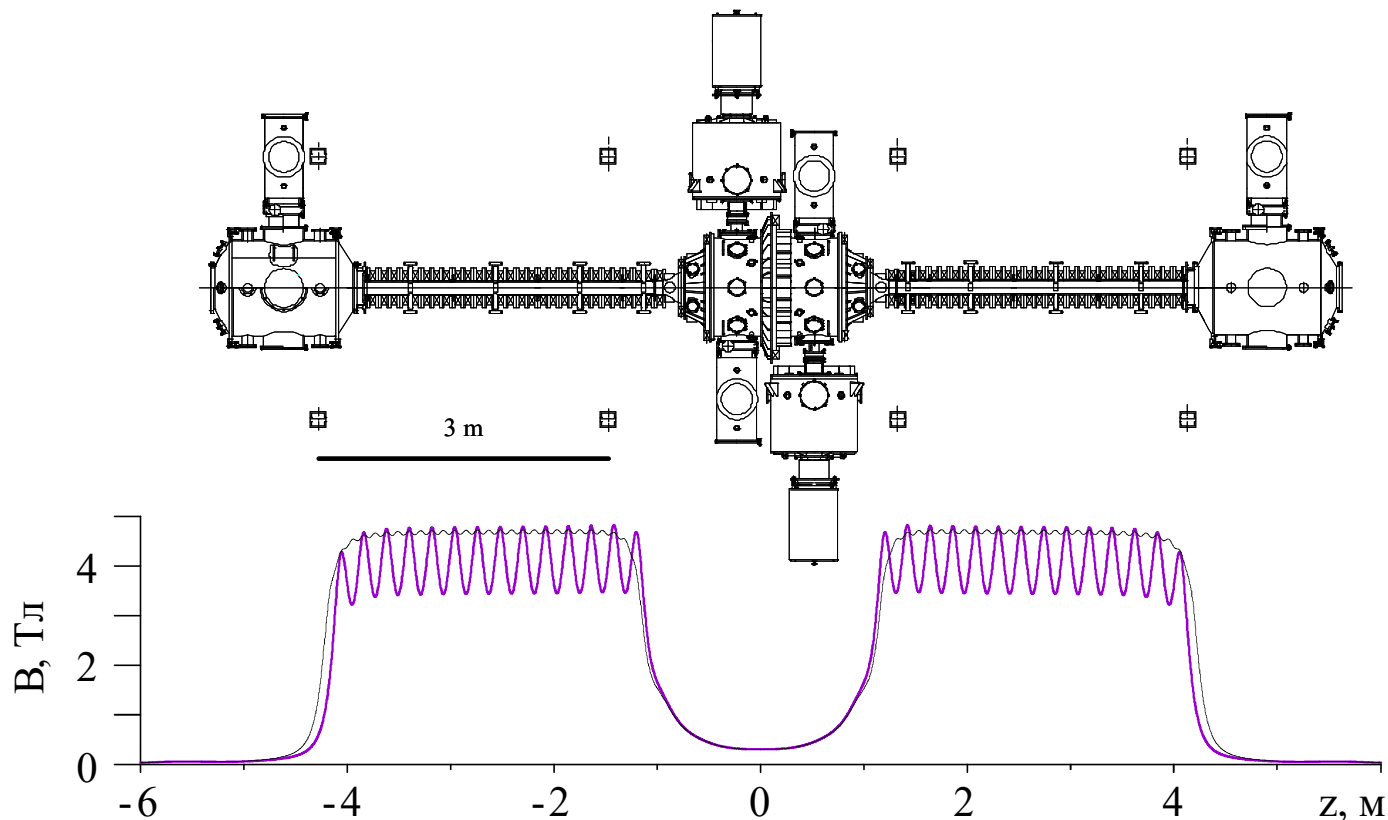
# Введение

---

## План доклада:

- ❖ Введение.
- ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
- ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Заключение.





## Основная цель создания установки:

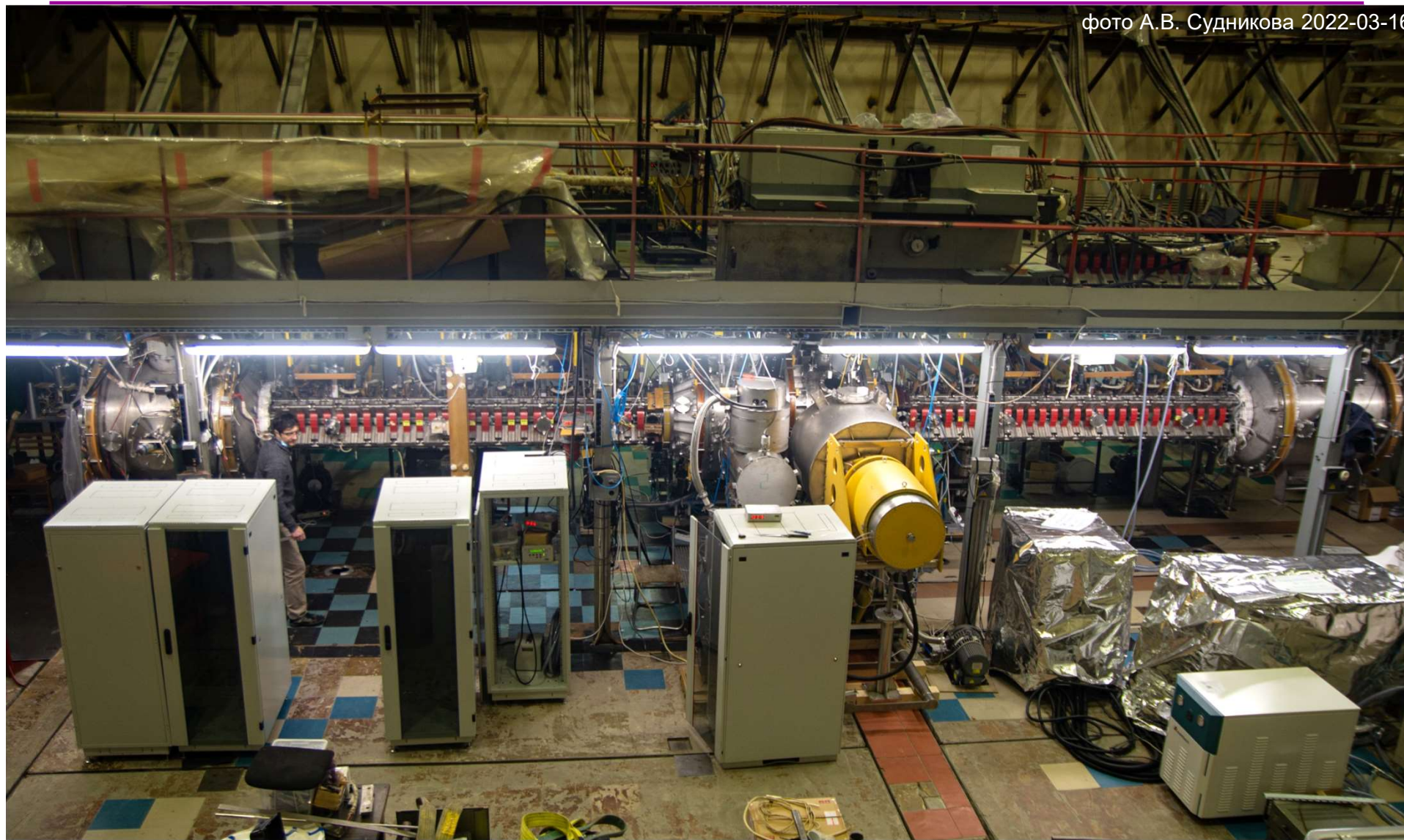
изучение технологии подавления продольных потерь частиц и энергии из открытых ловушек с плазмой реакторного класса и создание физической базы для ГДМЛ.

Работы на ГОЛ-НВ войдут в Мероприятие 1.1.6 федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».



## Установка ГОЛ-НВ

фото А.В. Судникова 2022-03-16

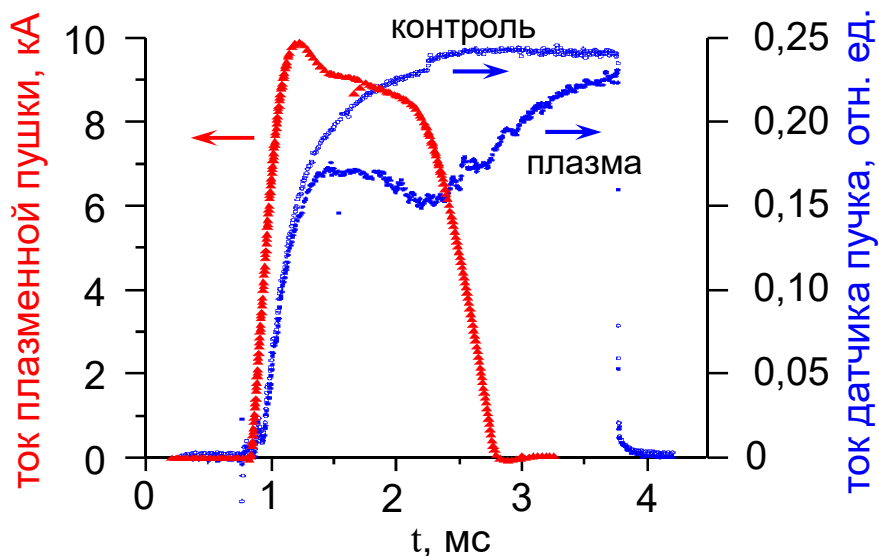


В начале 2021 года начались эксперименты с полной конфигурацией ловушки.

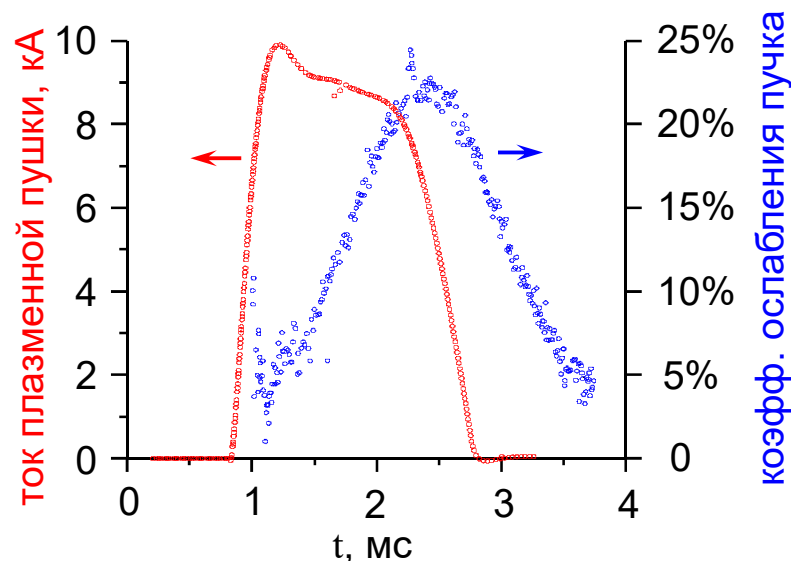
# Инжекция пучков в плазму

- Проведены первые эксперименты по инъекции двух пучков с  $P_{\Sigma} = 1,1$  МВт плазму.
- Приведены результаты с одновременным включением плазмы и пучков при  $R = 7,5$ .

Динамика тока пучка с плазмой и без  
(центральная хорда)



Интегральное ослабление  
нейтрального пучка плазмой

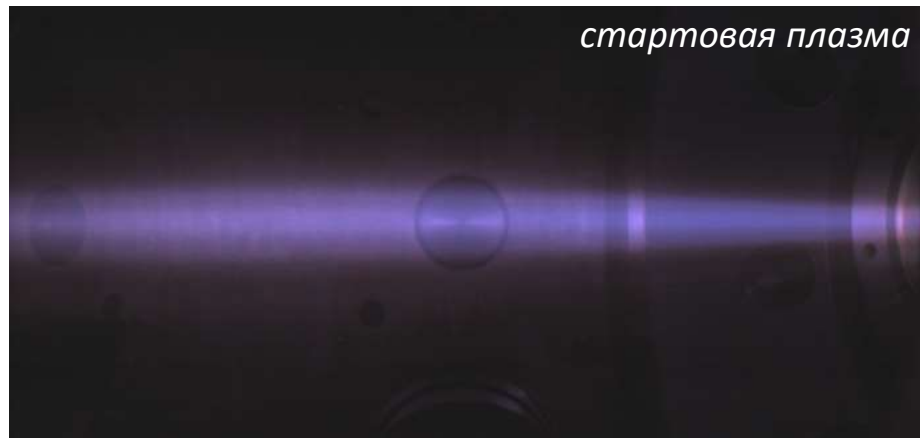


- Интегральный мгновенный коэффициент ослабления пучка плазмой мишени в отдельных режимах достигает **23%**.



# Плазма с пучками и без

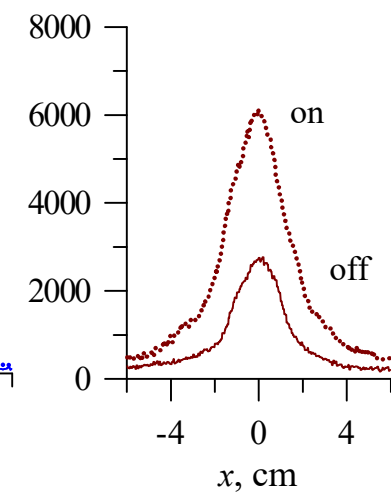
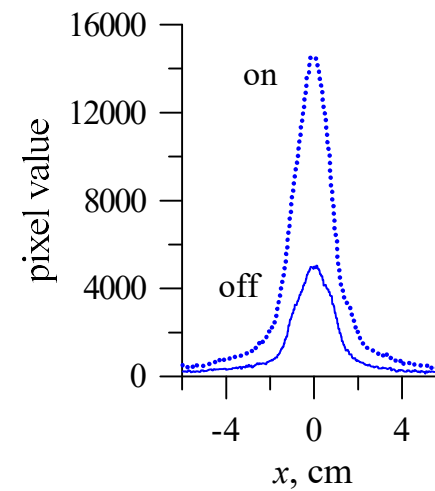
- Кадры сделаны на плато разряда,  $t = 1$  мс.



## Цветовые каналы ПЗС-матрицы

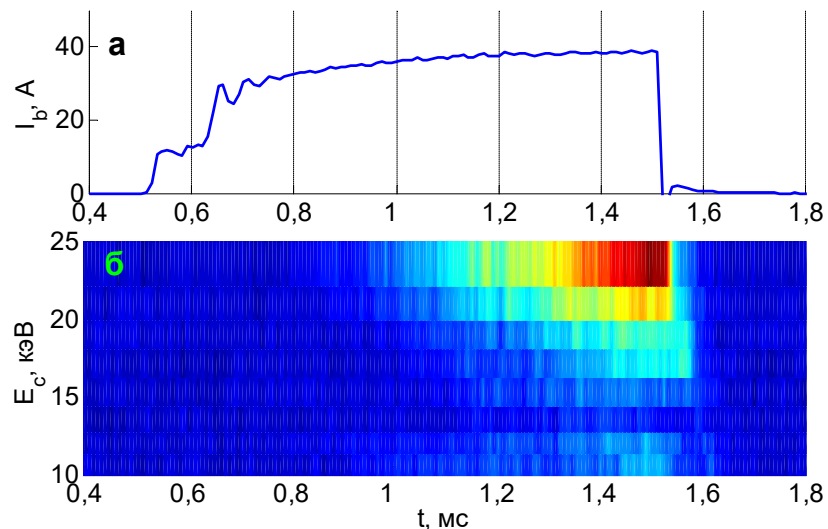
синий  
(примеси)

красный  
( $H_{\alpha}$ )



- Яркость плазмы возросла, существенных отличий размера и формы нет.

# Динамика спектра атомов перезарядки



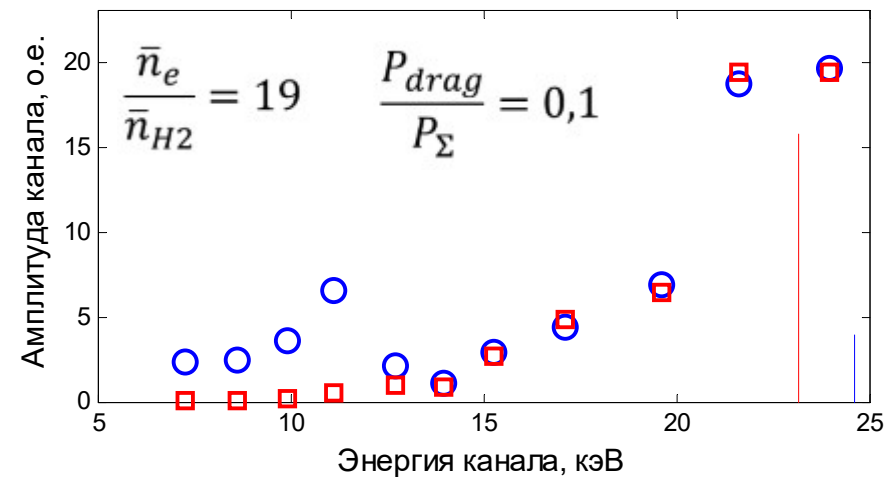
Измерение энергетического спектра быстрых ионов с помощью анализатора нейтралов перезарядки; а – осциллограмма тока пучка инжектора с энергией 25 кэВ; б – динамика сигналов в разных энергетических каналах анализатора

Модель: быстрые ионы тормозятся при столкновениях с электронами (drag) и теряются при столкновениях с нейтральным газом (перезарядка). Рассеяние ионов и их пространственная динамика не учитываются

По форме спектра нейтралов перезарядки можно найти отношение средних (по траектории иона) концентраций электронов и молекул водорода, а также долю энергии, передаваемой от быстрых ионов электронам плазмы

## Спектр быстрых ионов

измерение      модель

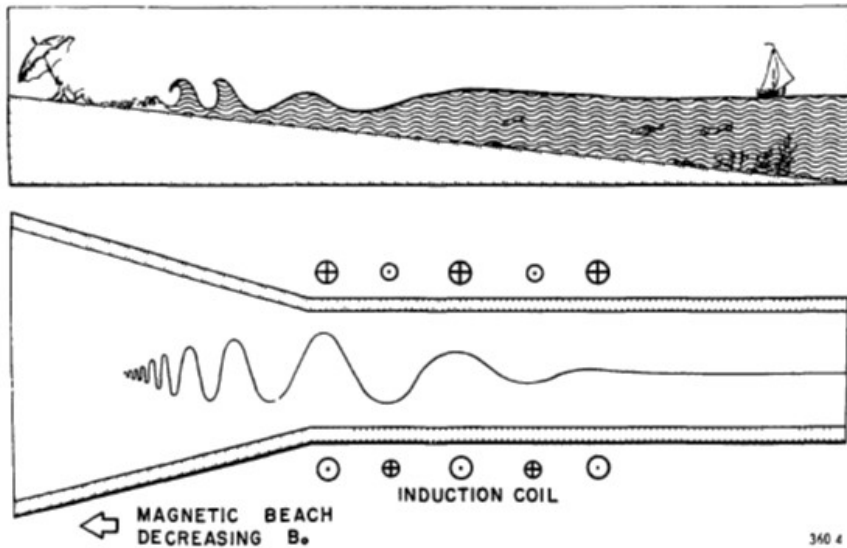


# Планы

---

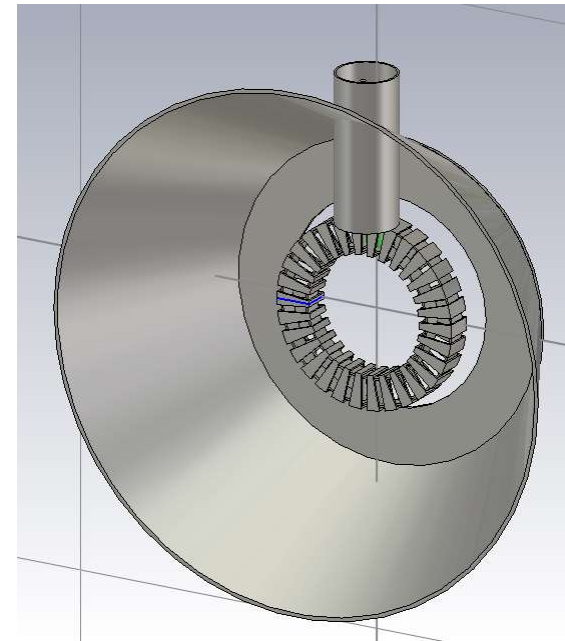
- Задачи работ в 2022 г.:
  - изучение и оптимизация физики нагрева плазмы нейтральными пучками;
  - изучение параметров популяции быстрых ионов;
  - изучение методов стабилизации плазмы в ловушке;
  - приведение в порядок различных систем установки.
  
- Перспективные работы:
  - развитие диагностического комплекса установки;
  - разработка методов дополнительного нагрева плазмы.

# Ионно-циклотронный нагрев (магнитный берег)

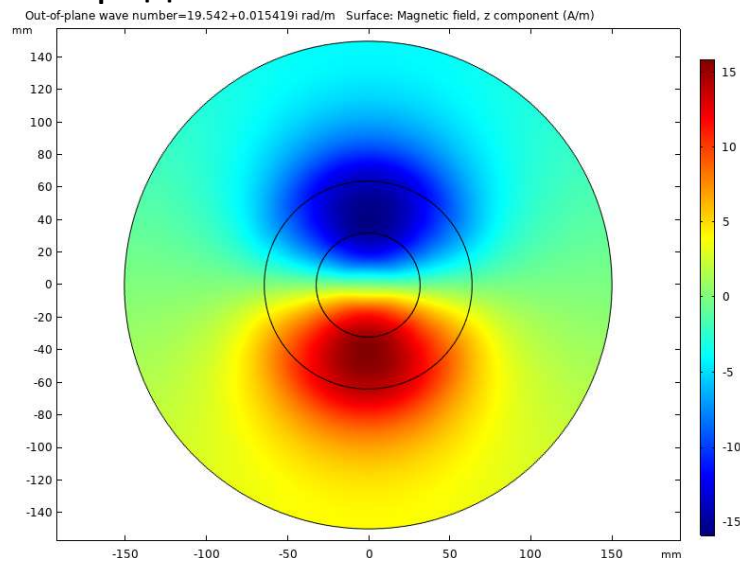


A "magnetic beach" for the thermalization of ion cyclotron waves  
(T.H. Stix)

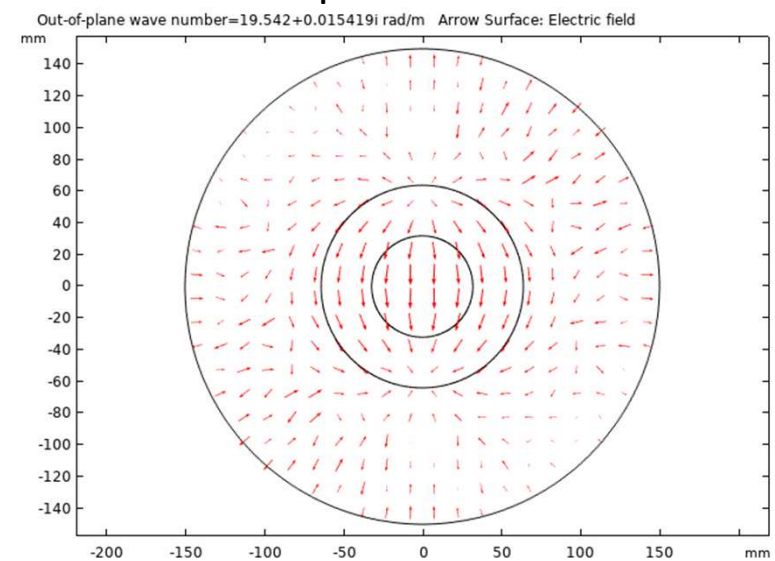
Антенна



Продольное магнитное поле



Электрическое поле



# Введение

---

## План доклада:

- ❖ Введение.
- ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
- ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Заключение.

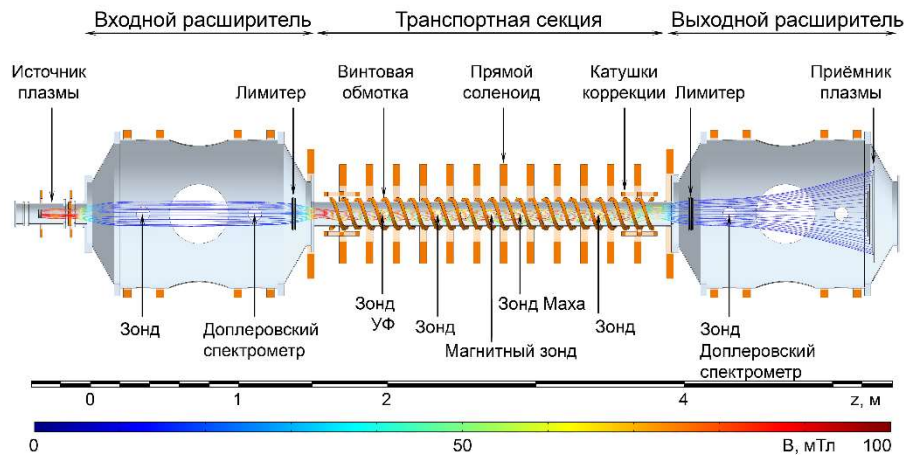


# Динамическое многопробочное удержание. Установка «СМОЛА»

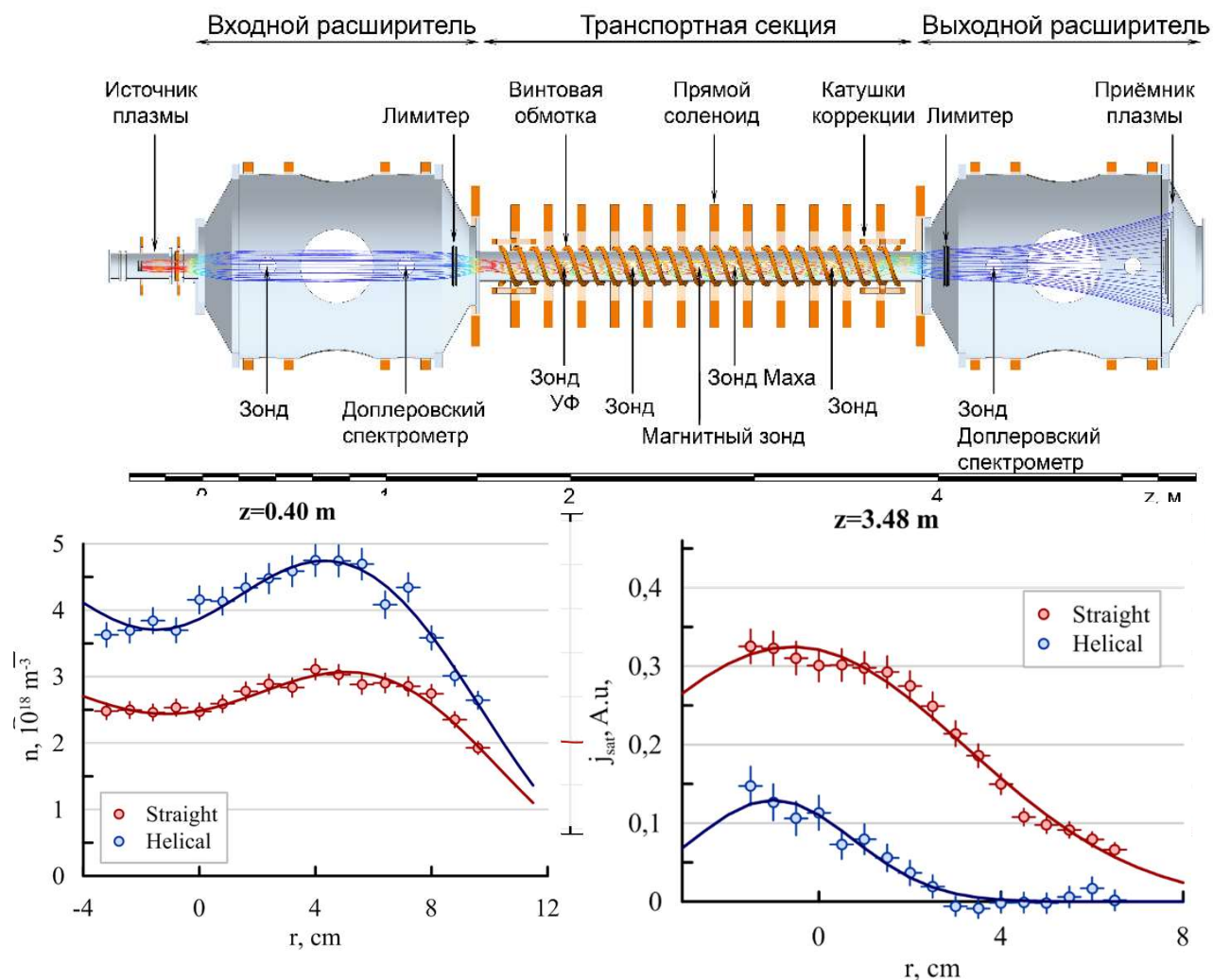


Установка «СМОЛА» создана в рамках «репутационного» гранта РФ. Запуск — конец 2017 года, в 2019 году доведена до проектной конфигурации

Задача: проверка подавления потока вращающейся плазмы в винтовом магнитном поле.

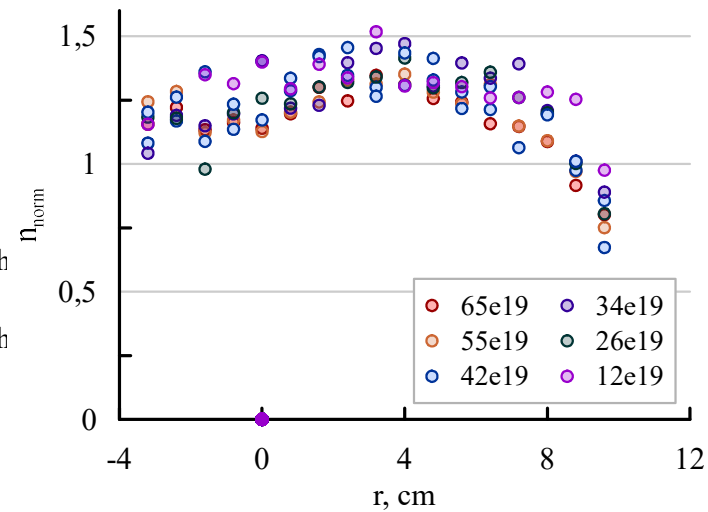
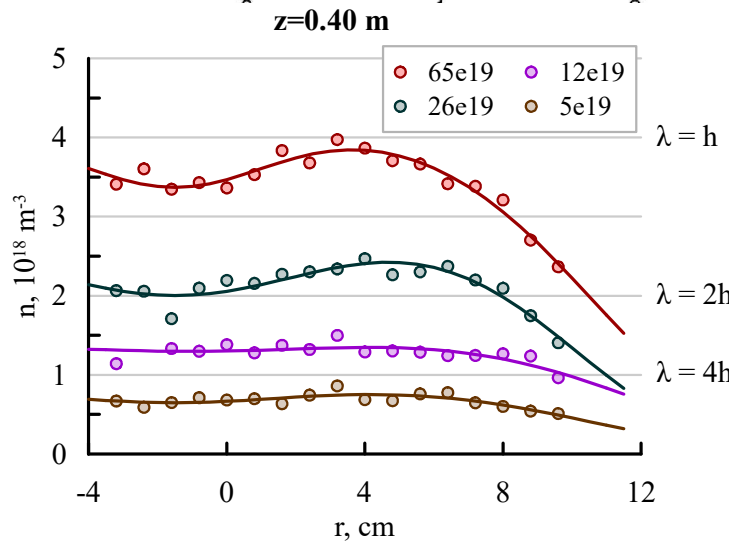
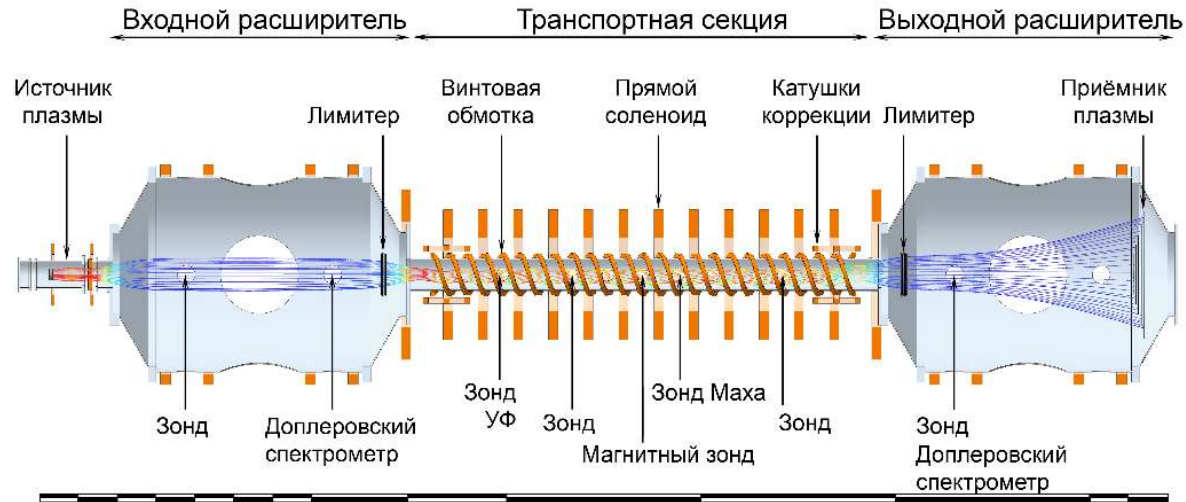


# Подавление потока плазмы



Улучшение удержания при максимальных параметрах даёт рост плотности в 1.6 раза, что отвечает эффективному пробочному отношению винтовой секции  $R_{\text{eff}} > 10$ . Поток на выходе соответствует теории.

# Эффективное удержание плазмы (режим редких столкновений)



# Планы развития эксперимента на установке СМОЛА

---

- Детальное изучение течения плазмы через винтовую секцию в режиме редких кулоновских соударений.
- Изучение спектра колебаний плазмы. Поиск механизмов коллективного рассеяния ионов.
- Изучение методов стимулированного рассеяния ионов (например, перекрытие резонансов при одновременной гофрировке ведущего поля и винтовой).

$$\omega/k \approx \Omega_b/k_c$$

*(I.S. Chernoshtanov, D.A. Ayupov// Phys. Plasmas 28, 032502, 2021.)*

- Разработка методов дополнительного нагрева ионов плазменной струи, расширение диапазона параметров плазмы.

# Введение

---

## План доклада:

- ❖ Введение.
- ❖ Установка ГОЛ-NB – импульсная модель ГДМЛ.
- ❖ Установка СМОЛА – спиральная многопробочная ловушка.
- ❖ Заключение.

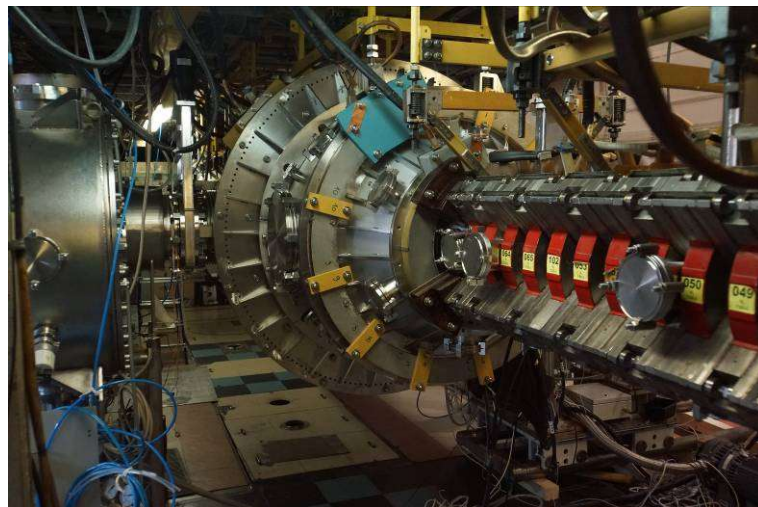
## Заключение

---

- В ИЯФ СО РАН развивается программа исследования многопробочного удержания плазмы. Для этого сооружены 2 установки: СМОЛА и ГОЛ-NB.
- С 2021 года начаты исследования на установке ГОЛ-NB в полной конфигурации. Выполнены первые эксперименты по инъекции пучков нейтральных атомов в плазму. Будет продолжено развитие установки: создание диагностик и разработка методов дополнительного нагрева плазмы.
- В эксперименте на спиральной ловушке СМОЛА подтверждена эффективность винтовых пробок. Эффективность сохраняется при переходе в режим редких кулоновских столкновений. Запланированы эксперименты по идентификации возможных механизмов аномального рассеяния ионов.

**Спасибо за внимание!**

центральная ловушка и соленоид



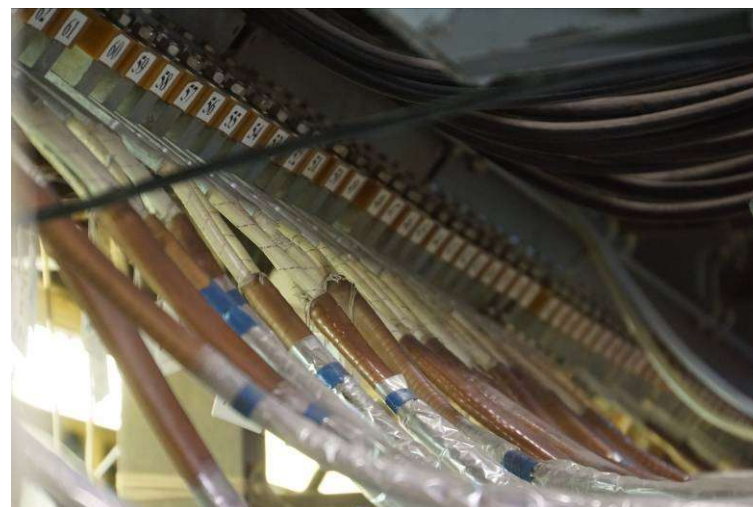
бак плазменной пушки и пост откачки



инжектор №2 и пост откачки



кабели питания катушек (до 6 кВ, 10 кА каждый)







# Область параметров

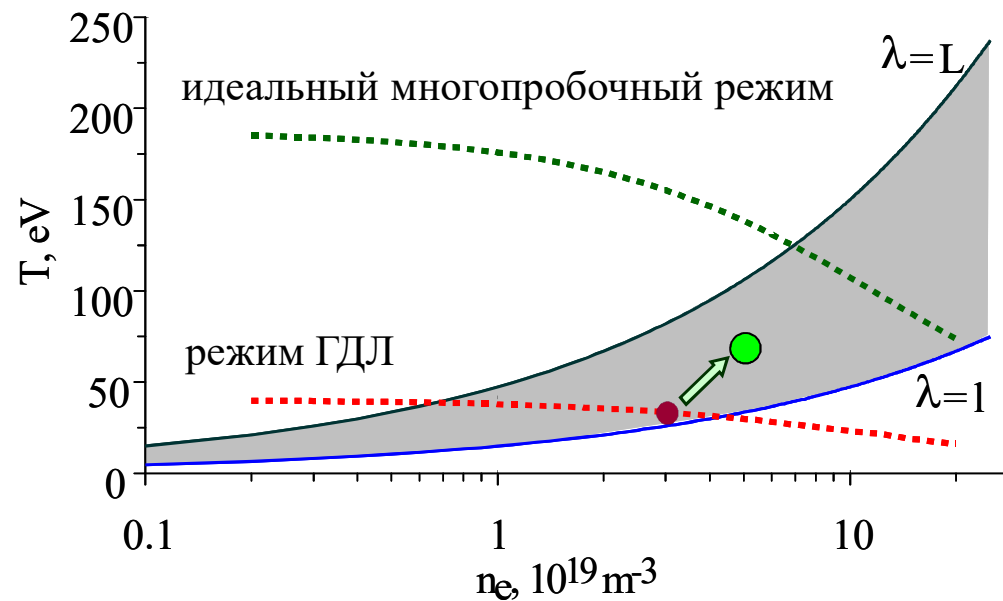
## Достижимые параметры плазмы

если будет достигнута стабилизация плазмы, то её параметры будут определяться энергобалансом между нагревом и продольными потерями.

### Доступная область параметров

пунктир – разрешено по энергобалансу

серый сектор – разрешено по физике

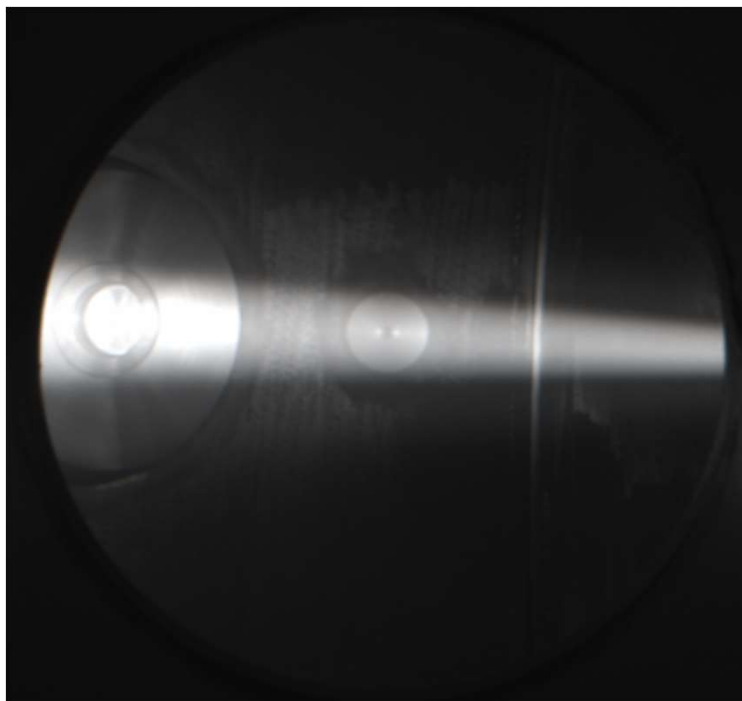


# Стартовая плазма в ГОЛ-NB

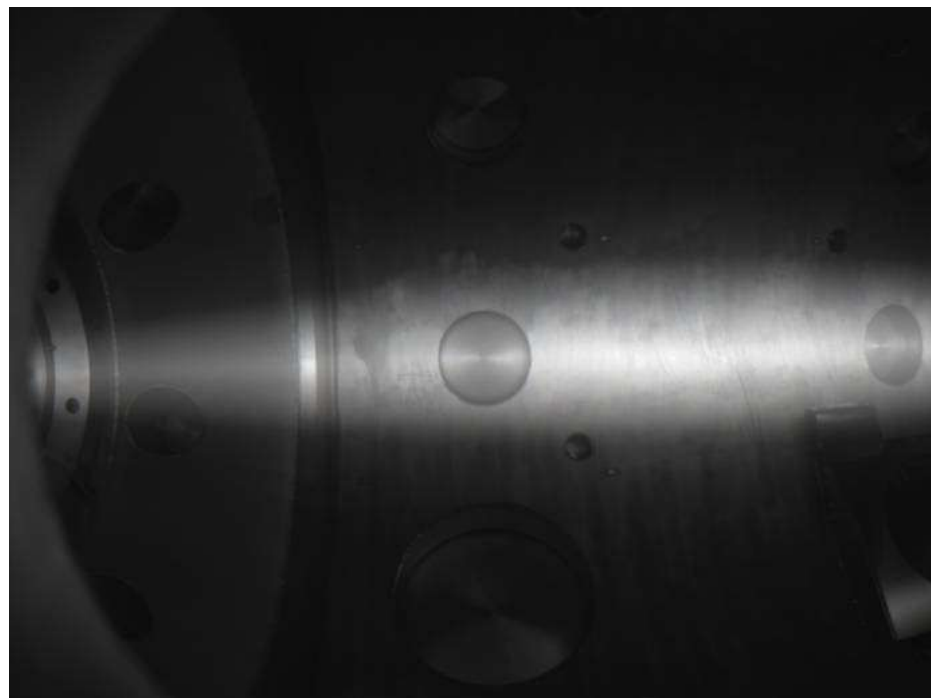
## Плазма из дугового источника

## Плазма в центральной ловушке

NB4856 \* 29.01.2021



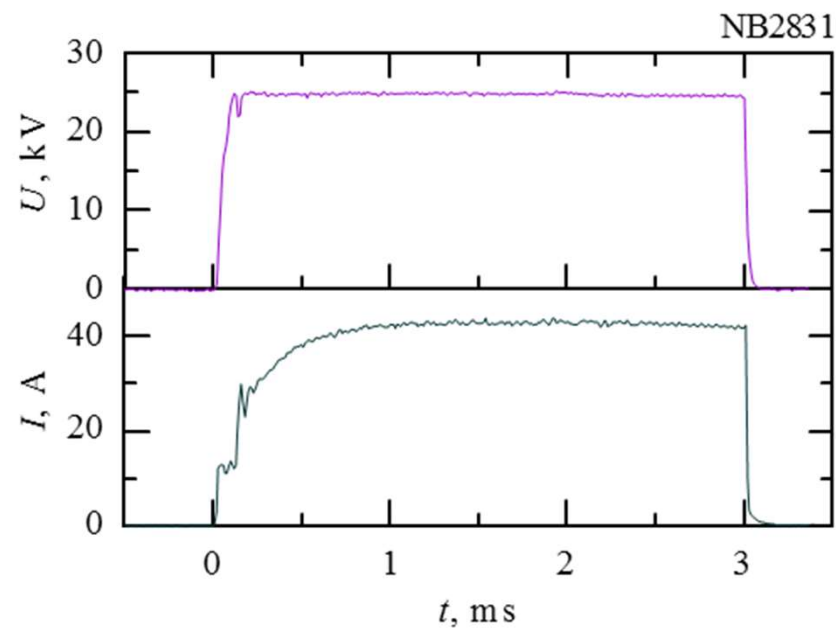
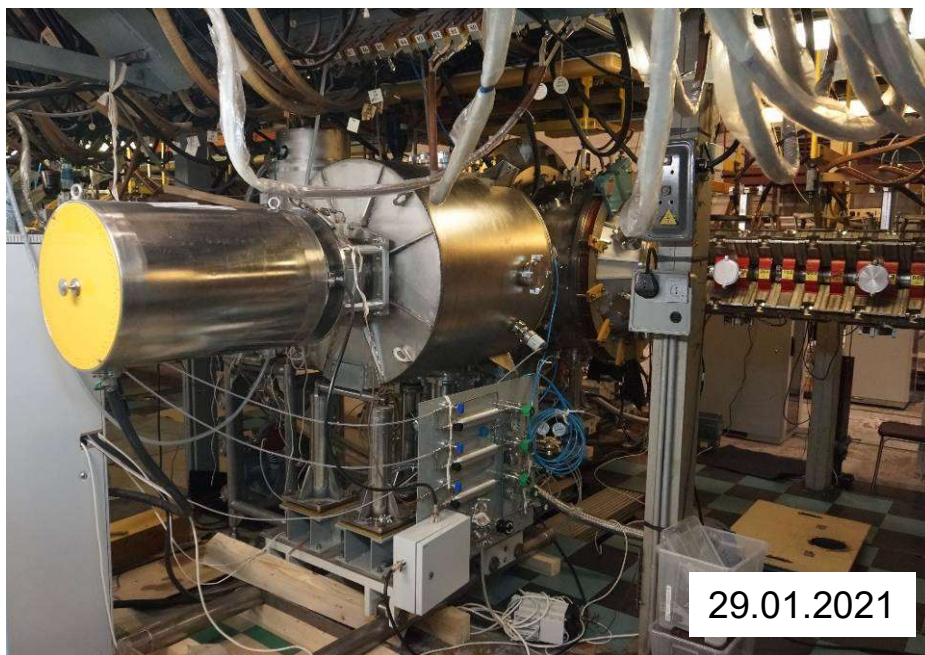
Струя плазмы распространяется слева направо из дугового источника (за полем зрения камеры) в сторону нарастающей магнитной индукции в секции сильного поля.



Плазменная струя расширяется после выхода из секции сильного поля. Оценка диаметра плазмы по её свечению даёт величину около 20 см.

# Инжектора для нагрева плазмы

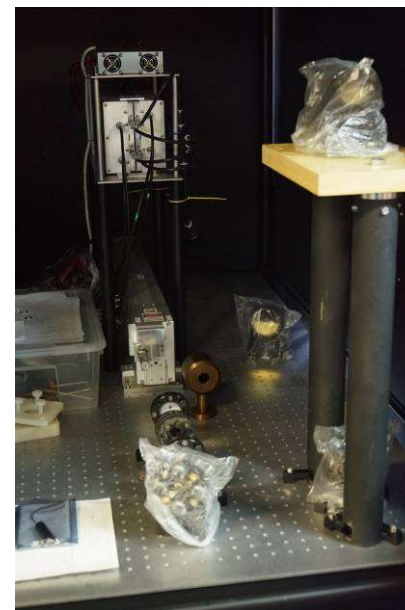
- Два инжектора изготовлены и испытаны с системами питания.
- Получена мощность 1 МВт в каждом ионном пучке, длительность до 5 мс.
- Изготовлена дополнительная магнитная защита.
- Монтаж на штатное место может быть выполнен в течение недели.
- Диагностика ослабления пучков в плазме в процессе подготовки.



# Системы диагностики плазмы

- **стартовый комплект диагностик включает:**
  - электротехнические измерения;
  - подвижные четырёхэлектродные ленгмюровские зонды;
  - ПЗС-камеры;
  - диагностический атомарный пучок 10 кэВ;
  - ослабление нагревных пучков;
  - простейшие магнитные зонды;
  - мониторы излучения плазмы;
  - обзорный спектр свечения плазмы;
  - динамика давления газа.
- **ведётся подготовка диагностик:**
  - анализатор нейтралов перезарядки;
  - доплеровская спектроскопия высокого разрешения;
  - скоростные видеокамеры;
  - интерферометр Майкельсона с  $\lambda = 10,6$  мкм.
- **другие важные системы требуют разработки.**

стол с частью элементов интерферометра с  $\lambda = 10,6$  мкм



диагностический инжектор



два двойных полихроматора



четырёхэлектродные зонды

