

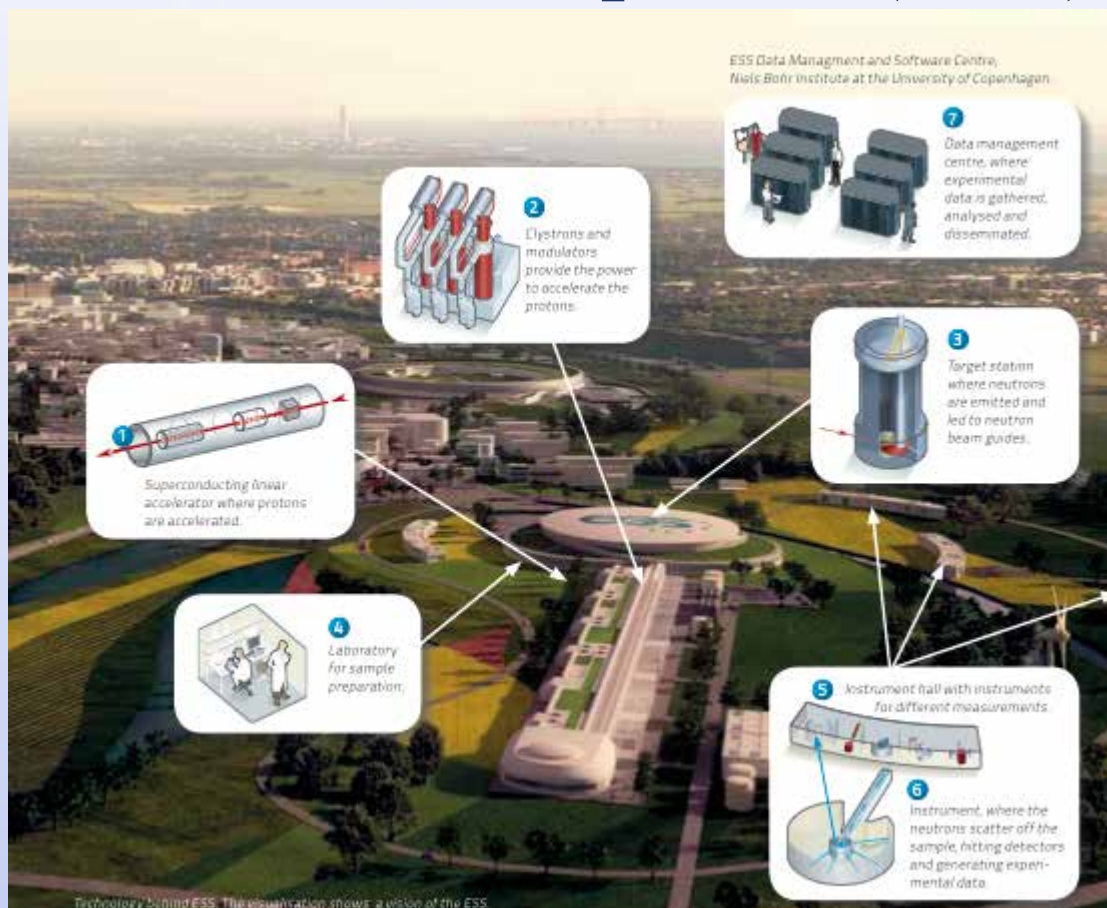
# СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЭЦР ИСТОЧНИКИ ПРОТОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Скалыга В.А., Голубев С.В., Изотов И.В.,  
Викторов М.Е., Выбин С.С., Киселёва Е.М., Поляков А.В., Разин С.В.

*Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук  
им. А.В. Гапонова-Грехова*



# Европейский испарительный источник нейтронов (ESS)



## Ионный источник

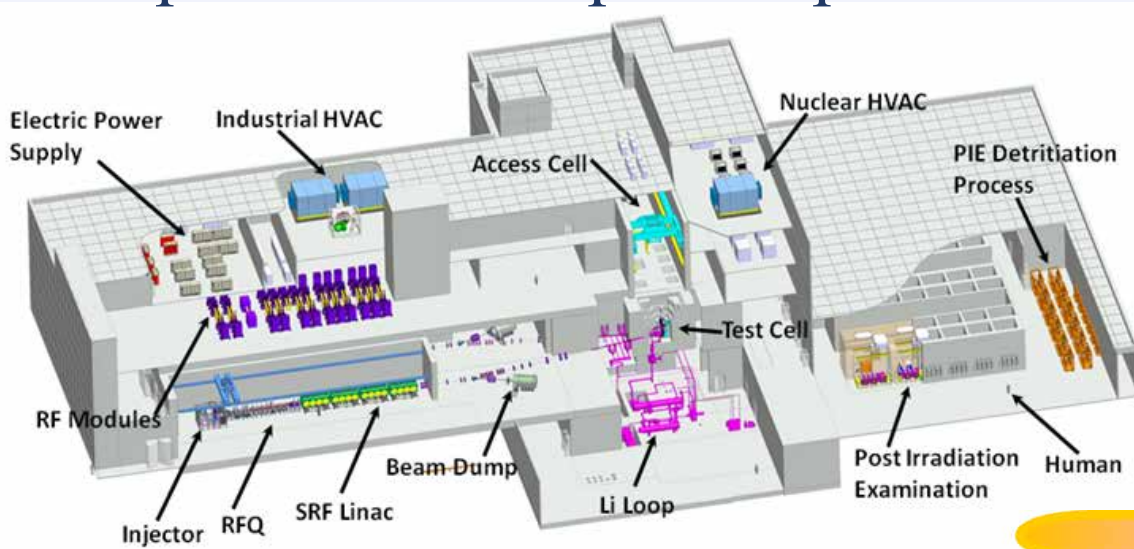
$H^+$ , ЭЦР 2.45 ГГц,

**90 мА**, 75 кВ,

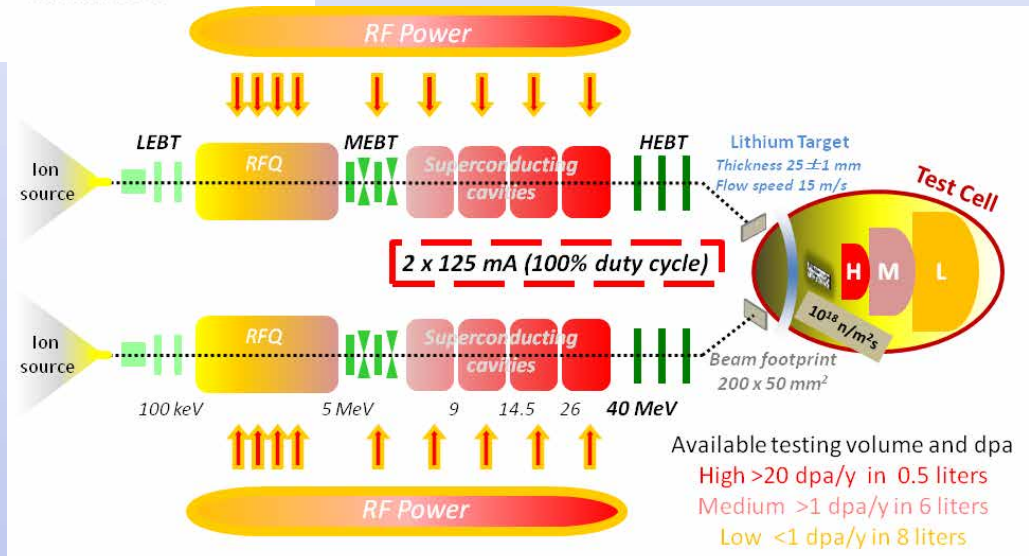
14 Гц 3 мс,

$\epsilon=0.2 \text{ л} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$

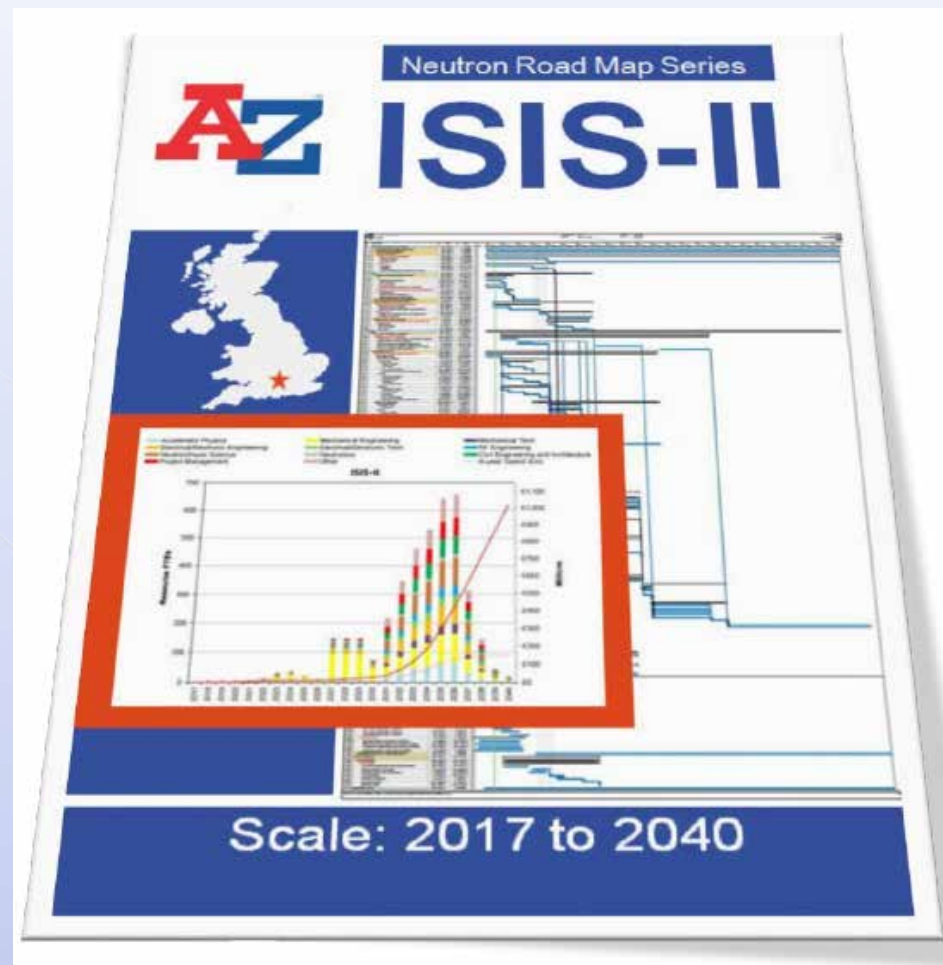
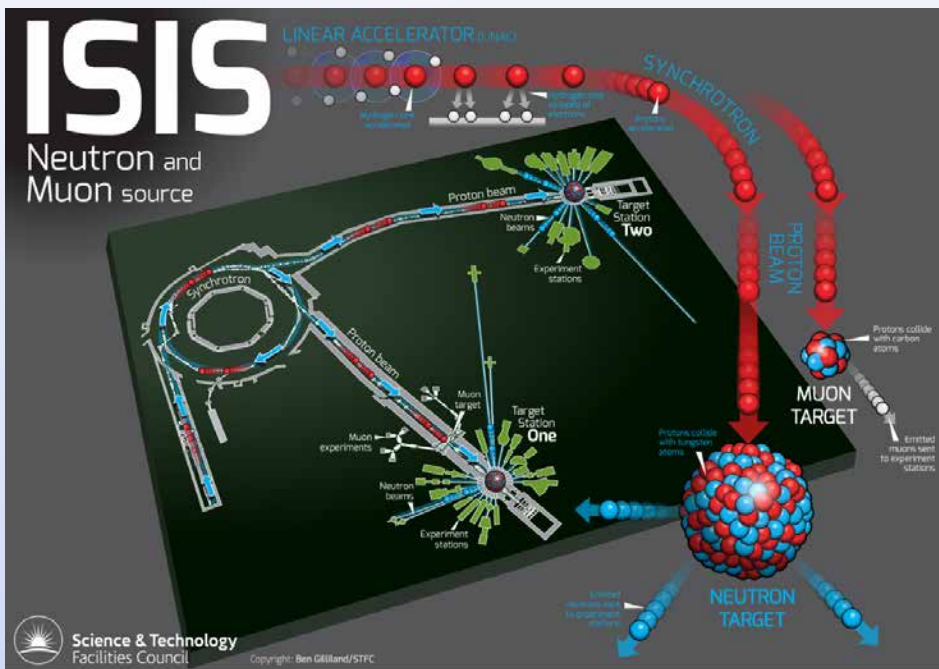
# IFMIF - международная установка для исследований материалов для термоядерных систем



**Ионный источник**  
 $D^+$ , ЭЦР 2.45 ГГц  
**2 x 125 mA**, 100 кВ, непрерыв  
 $\varepsilon=0.2$  п·мм·мрад



# ISIS II исследовательский источник нейтронов и мюонов



Ионный источник

$H^+$ , ?????,

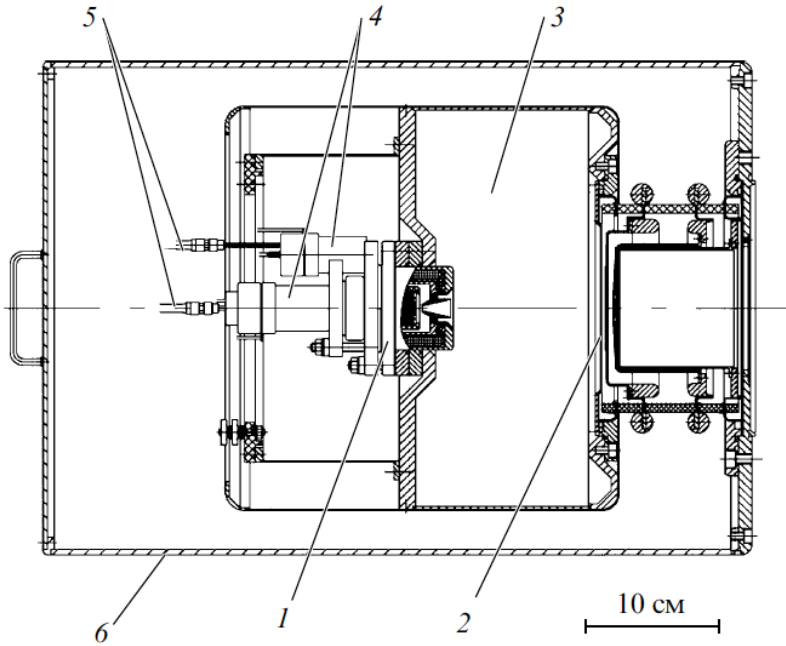
**250 мА**, ??? кВ,

100 Гц,

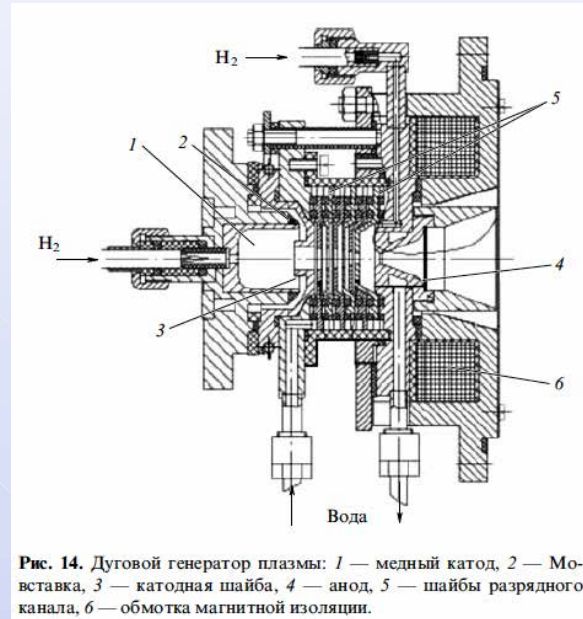
$\epsilon=0.2 \text{ л} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$

# Дуговые ионные источники (ИЯФ СО РАН)

Бельченко Ю И, Давыденко В И, Дейчули П П, Емелев И С, Иванов А А, Колмогоров В В, Константинов С Г, Краснов А А, Попов С С, Санин А Л, Сорокин А В, Ступишин Н В, Шиховцев И В, Колмогоров А В, Атлуханов М Г, Абдрашитов Г Ф, Драничников А Н, Капитонов В А, Кондаков А А "Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН" *УФН* **188** 595–650 (2018)



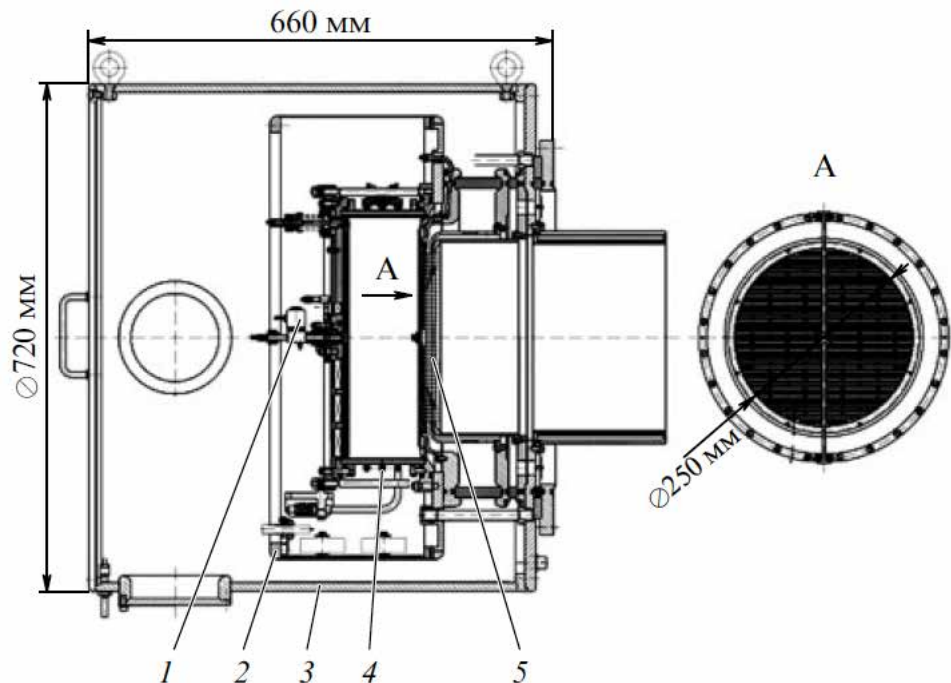
**Рис. 37.** Ионный источник диагностического инжектора ДИНА-5Ф: 1 — дуговой генератор плазмы, 2 — ИОС, 3 — экспансерный объём, 4 — импульсные газовые клапаны, 5 — газовые трубки, 6 — корпус.



**Рис. 14.** Дуговой генератор плазмы: 1 — медный катод, 2 — Мо-вставка, 3 — катодная шайба, 4 — анод, 5 — шайбы разрядного канала, 6 — обмотка магнитной изоляции.

- «Неограниченная» плотность потока
- Большая доля протонов
- Простота
- Импульсный режим
- Ограниченный срок службы (распыление катода)

## ВЧ-источники (ИЯФ СО РАН)



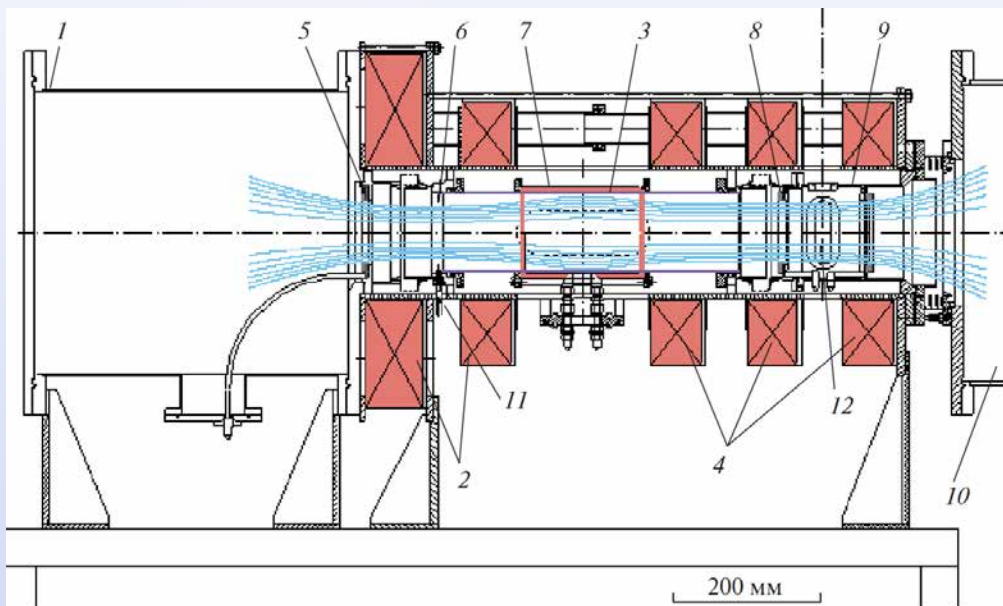
**Рис. 20.** Схема конструкции ионного источника [90]: 1 — газовый клапан, 2, 3 — магнитные экраны, 4 — ВЧ-антенна, 5 — электроды ИОС.

- Непрерывный и импульсный режим
- Долговечность
- Большой однородный объем плазмы
- **Относительно низкая плотность потока (100 мА/см<sup>2</sup>)**
- **Требуются настройки согласования**

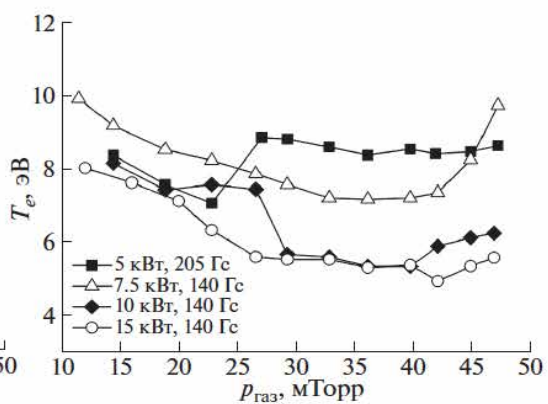
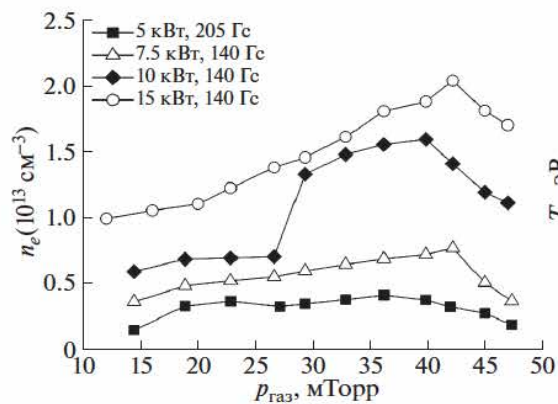
Бельченко Ю И, Давыденко В И, Дейчули П П, Емелев И С, Иванов А А, Колмогоров В В, Константинов С Г, Краснов А А, Попов С С, Санин А Л, Сорокин А В, Ступишин Н В, Шиховцев И В, Колмогоров А В, Атлуханов М Г, Абдрашитов Г Ф, Драничников А Н, Капитонов В А, Кондаков А А "Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН" *УФН* **188** 595–650 (2018)

# Геликонные источники (ИЯФ СО РАН)

Е. И. Кузьмин, И. В. Шиховцев. Геликонный источник плотной плазмы для линейных плазменных установок  
 Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 6, стр. 507-517

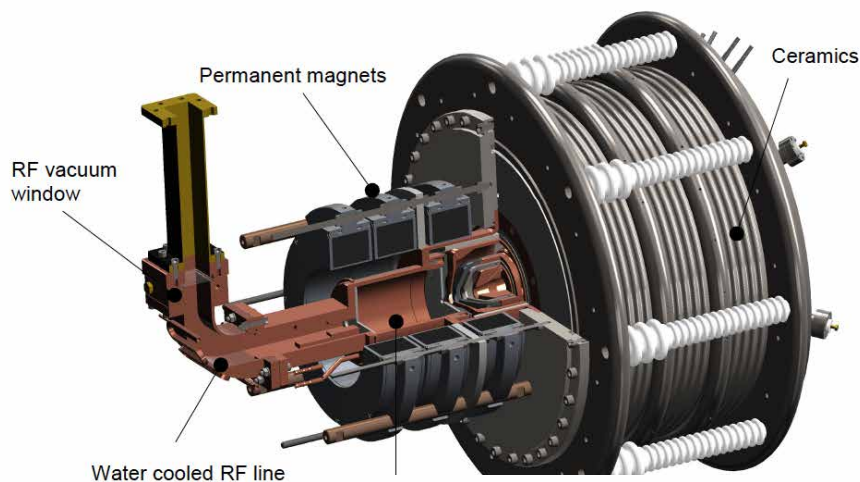


- Плотность плазмы на порядок выше ( $10^{13} \text{ см}^{-3}$  против  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$  в ВЧ)



- Более сложная конструкция и согласование

# ЭЦР источники с нагревом 2,45 ГГц

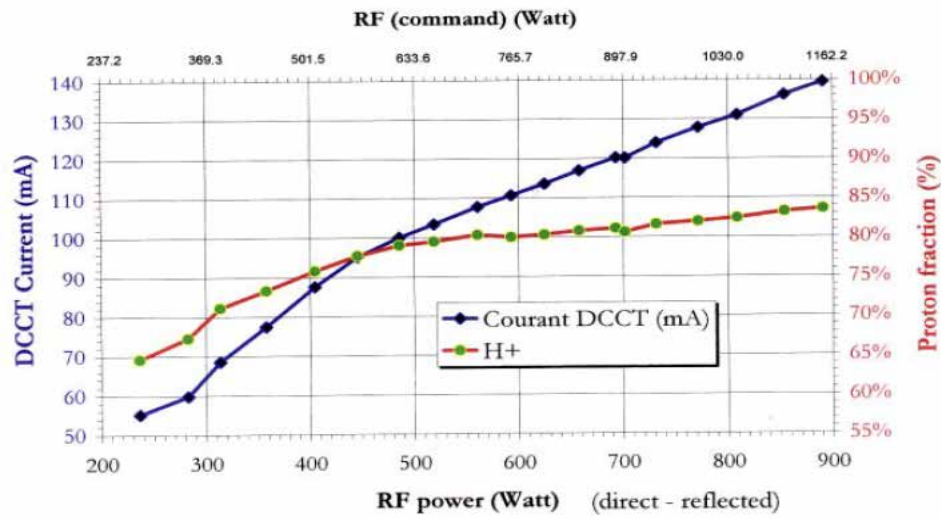


SILHI® : PROTON high intensity & high energy ECR

IFMIF – 125 mA

ESS - 90 mA

FAIR – 75 mA





# Гиротроны ИПФ РАН

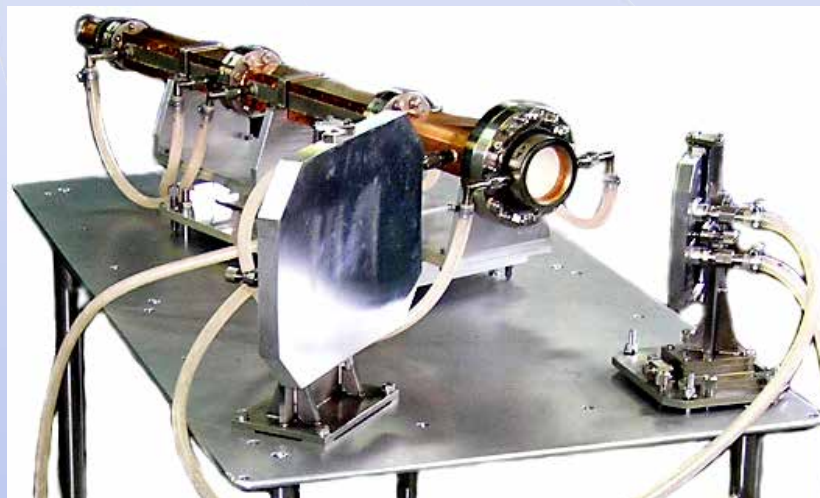
Диапазон частот: 24 ГГц – 1.2 ТГц

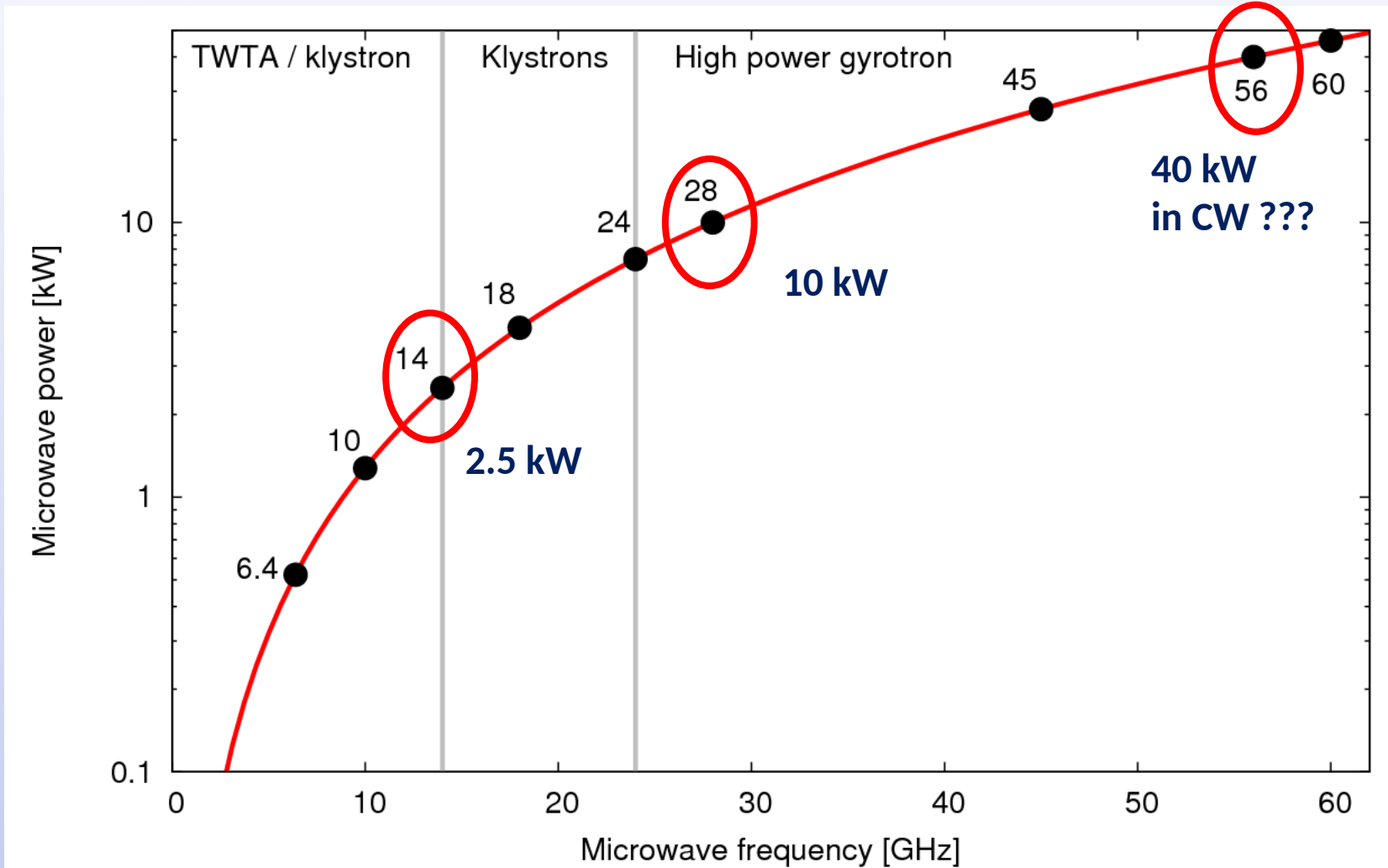
Мощность до 1 МВт

Импульсные и непрерывные режимы работы

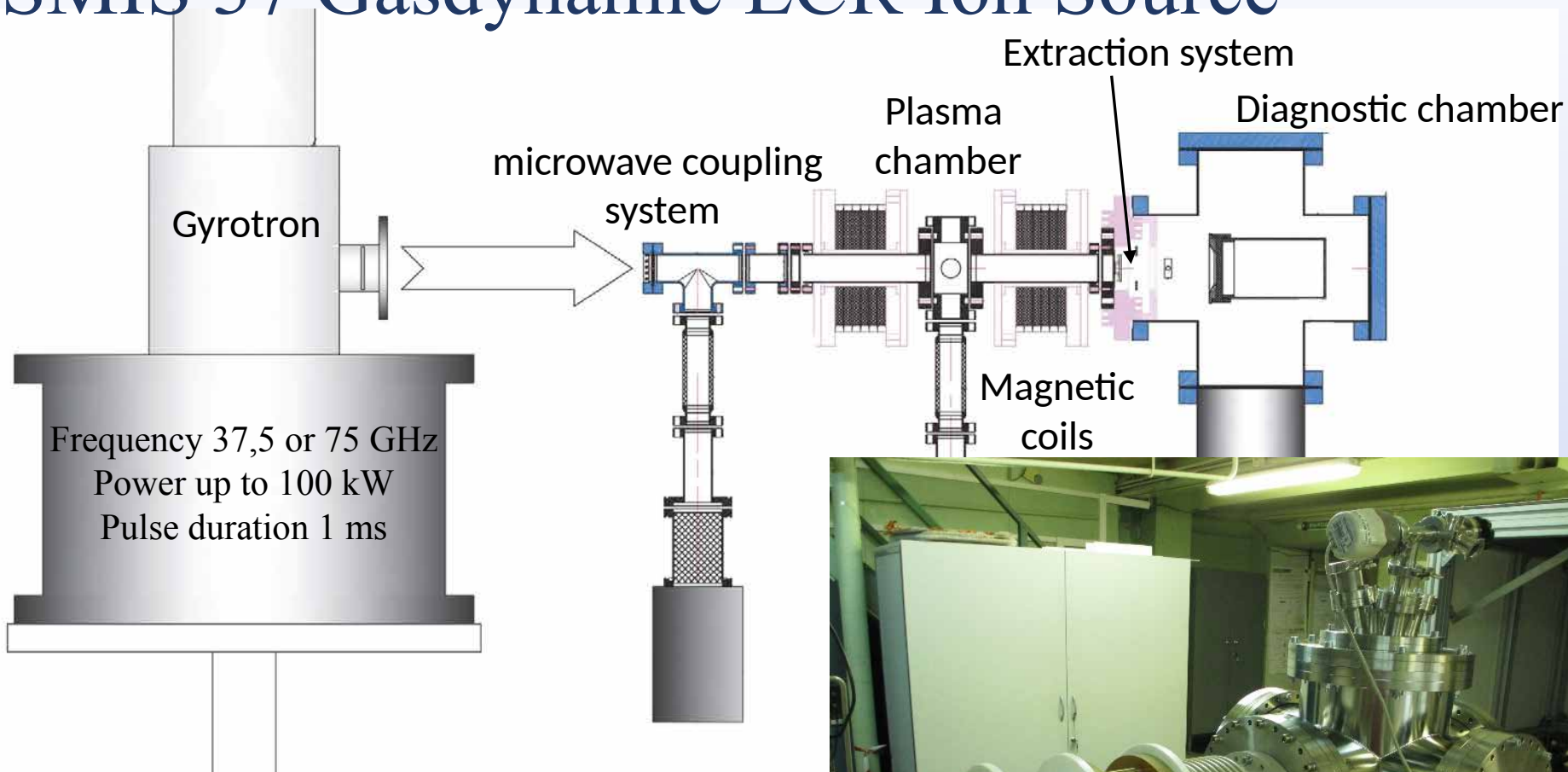
Для ЭЦР ионных источников:

- 28 ГГц/10 кВт
- 45 ГГц/20 кВт
- 60 ГГц/300 кВт - импульс

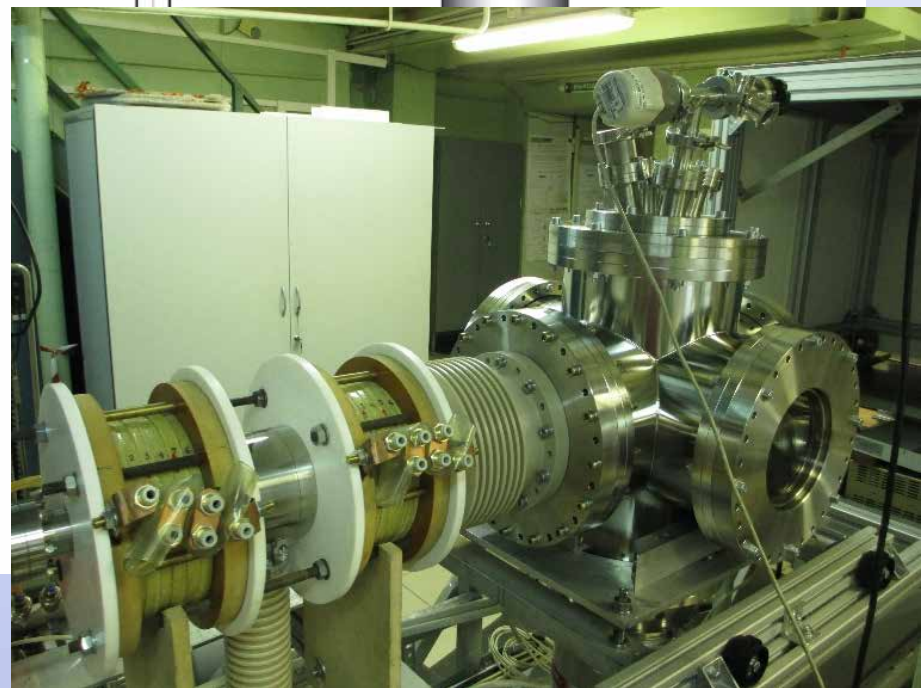




# SMIS 37 Gasdynamic ECR Ion Source



Ion beam current up to 500 mA ( $800 \text{ mA/cm}^2$ )  
Ion beam energy up to 100 keV  
Ion beams types: protons, deuterons,  
multicharged gaseous or metallic ions



# Классические и квазигазодинамические ЭЦР ионные источники

Coulomb electron scattering into the loss-cone

$$\tau_c = \ln R / \nu_{ei}$$

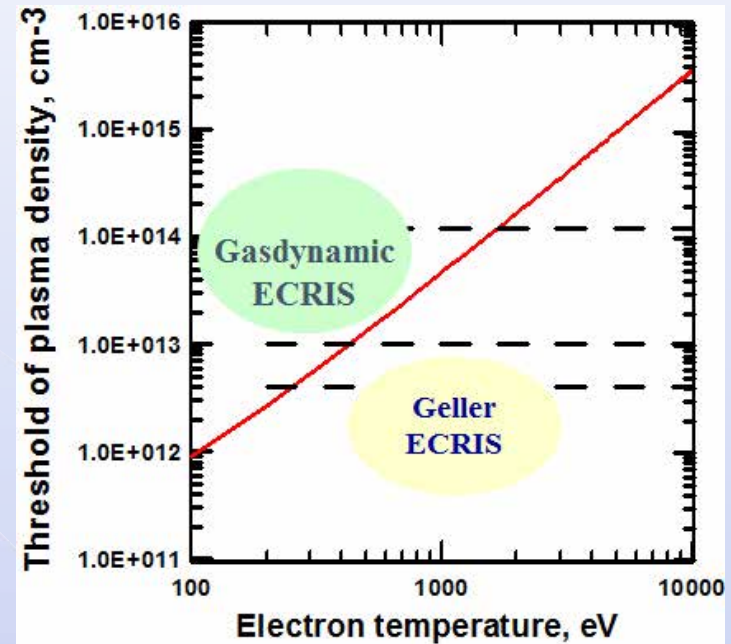
$$\tau_c > \tau_g \quad (\text{collisionless})$$

$$\tau_c < \tau_g \quad (\text{collisional})$$

Time of plasma escape

$$\tau_g = L_{eff} / V_s$$

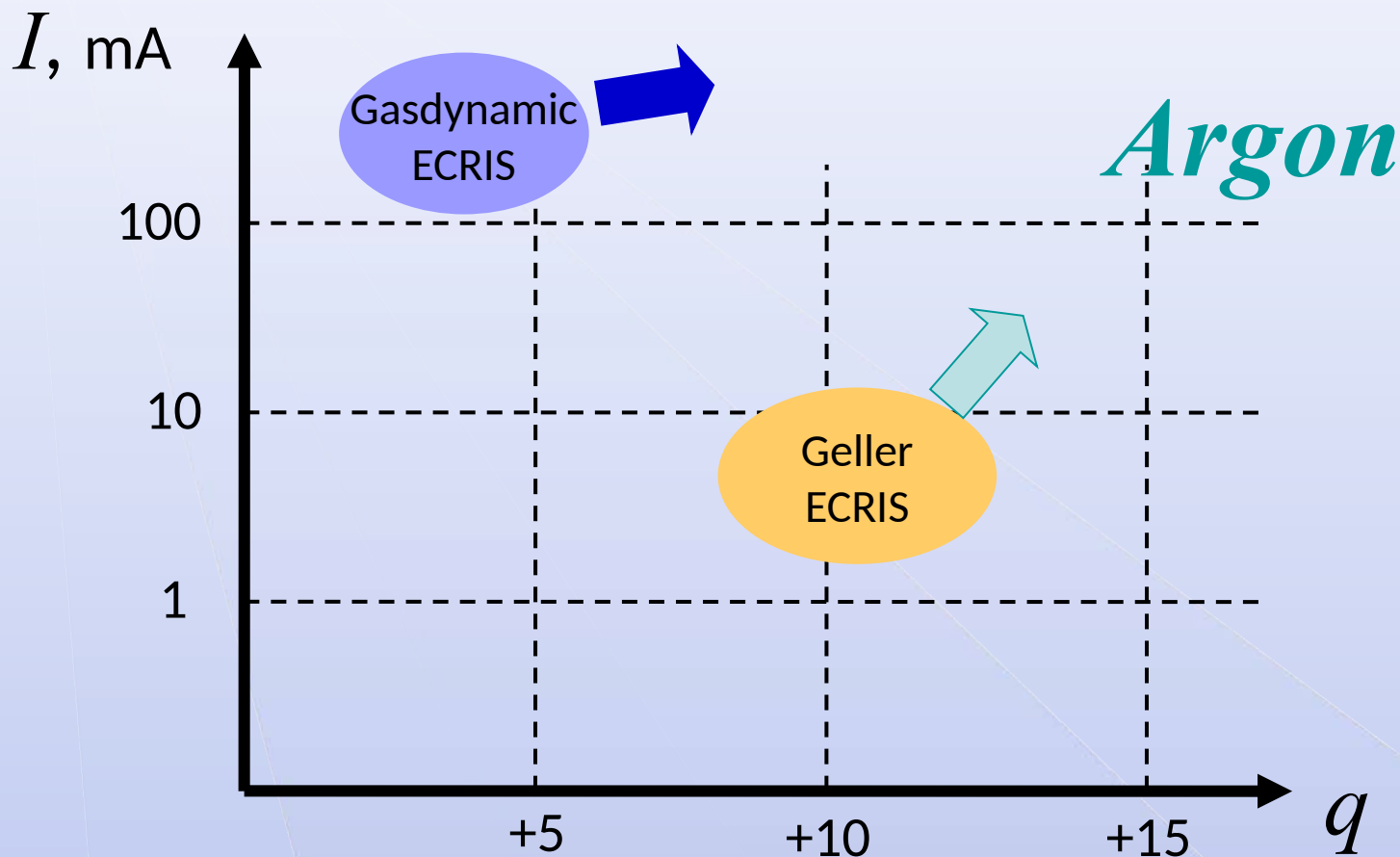
Quasi-gasdynamical confinement



$V_s$  – ion sound velocity

$L_{eff}$  – effective trap length

# Классические и квазигазодинамические ЭЦР ионные источники



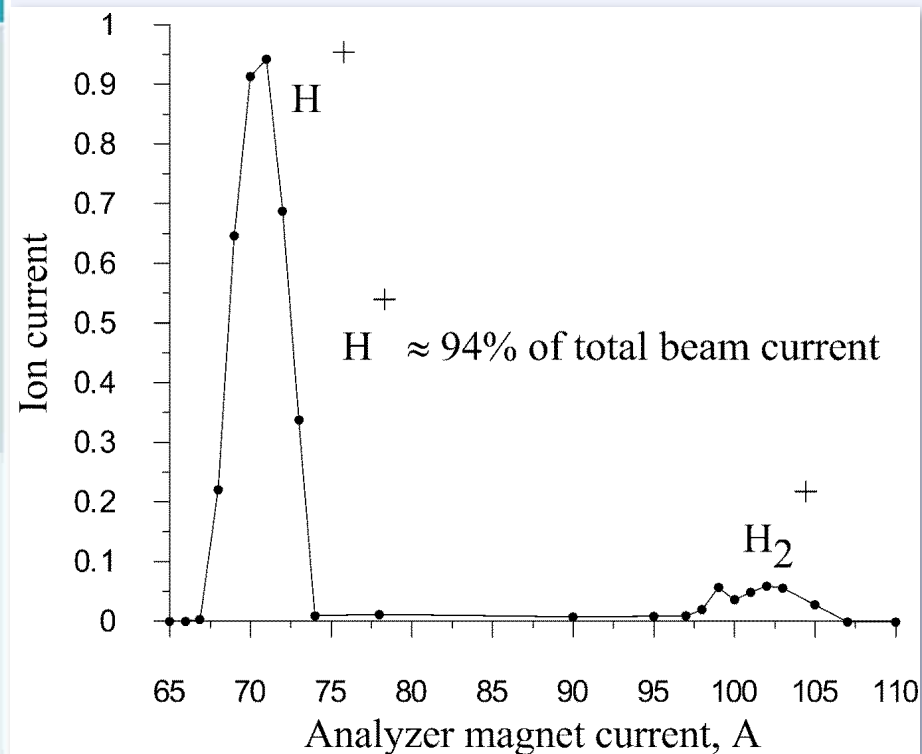
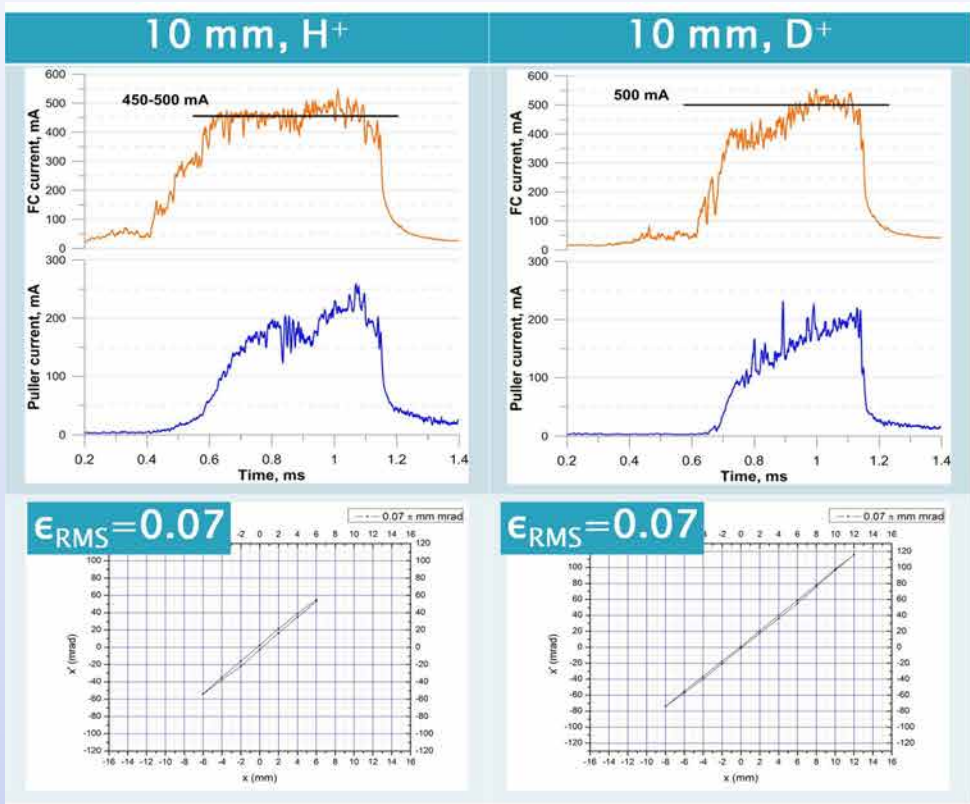
# Квазигазодинамические ЭЦР ионные источники

- Высокая плотность и низкое время жизни плазмы
- Высокая плотность потока ионов – единицы и десятки  $A/cm^2$  в пробке ловушки
- Низкий эмиттанс даже среди ЭЦР источников

Уникальные параметры плазмы на примере SMIS-37:

	Классические источники	SMIS-37
$N_e, cm^{-3}$	$x * 10^{11}$	$>10^{13}$
$\tau, \mu s$	$>1000$	5-100
$T_e, eV$	$>1000$	10-300

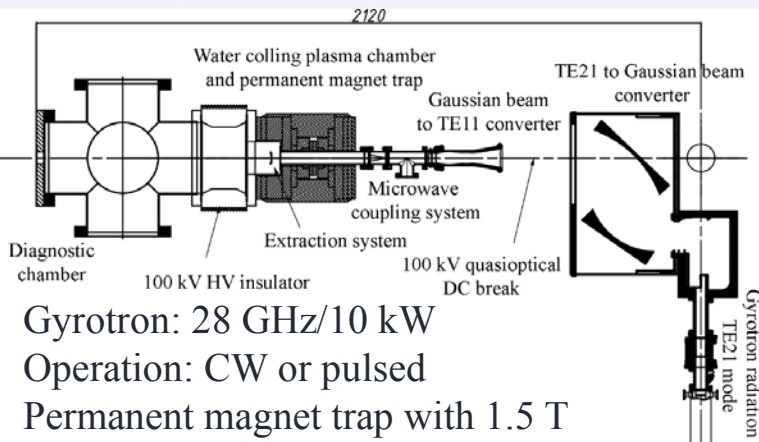
# Протонный пучок (10 мм) SMIS 37 GHz / 100 kW



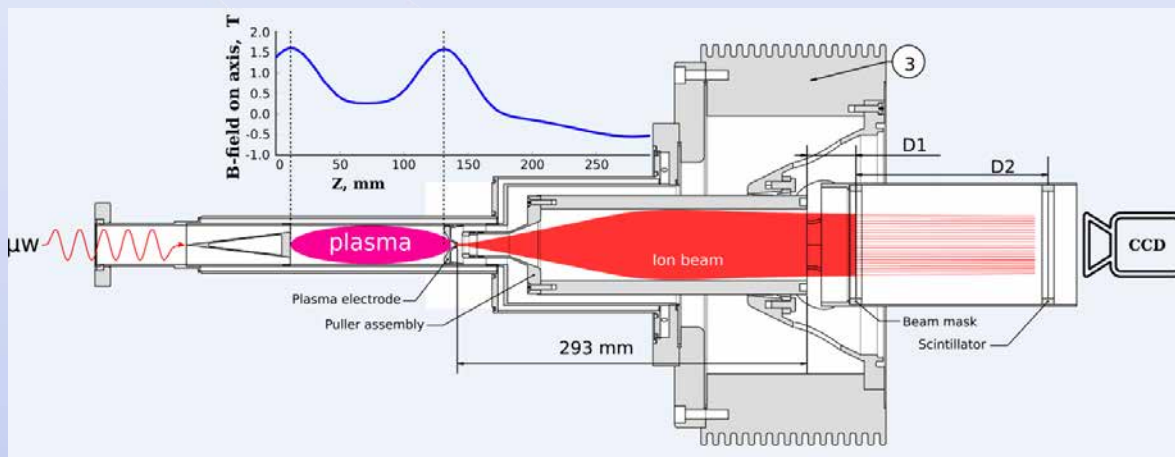
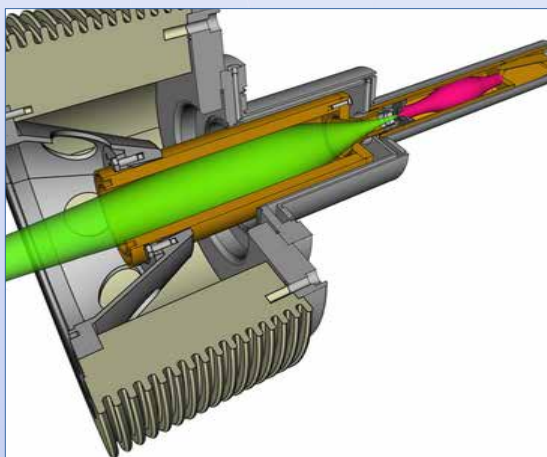
Результат перспективный, но конструкция источника сложная.  
Требовалось повышение технологичности.

# New *GISMO*

## (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation)



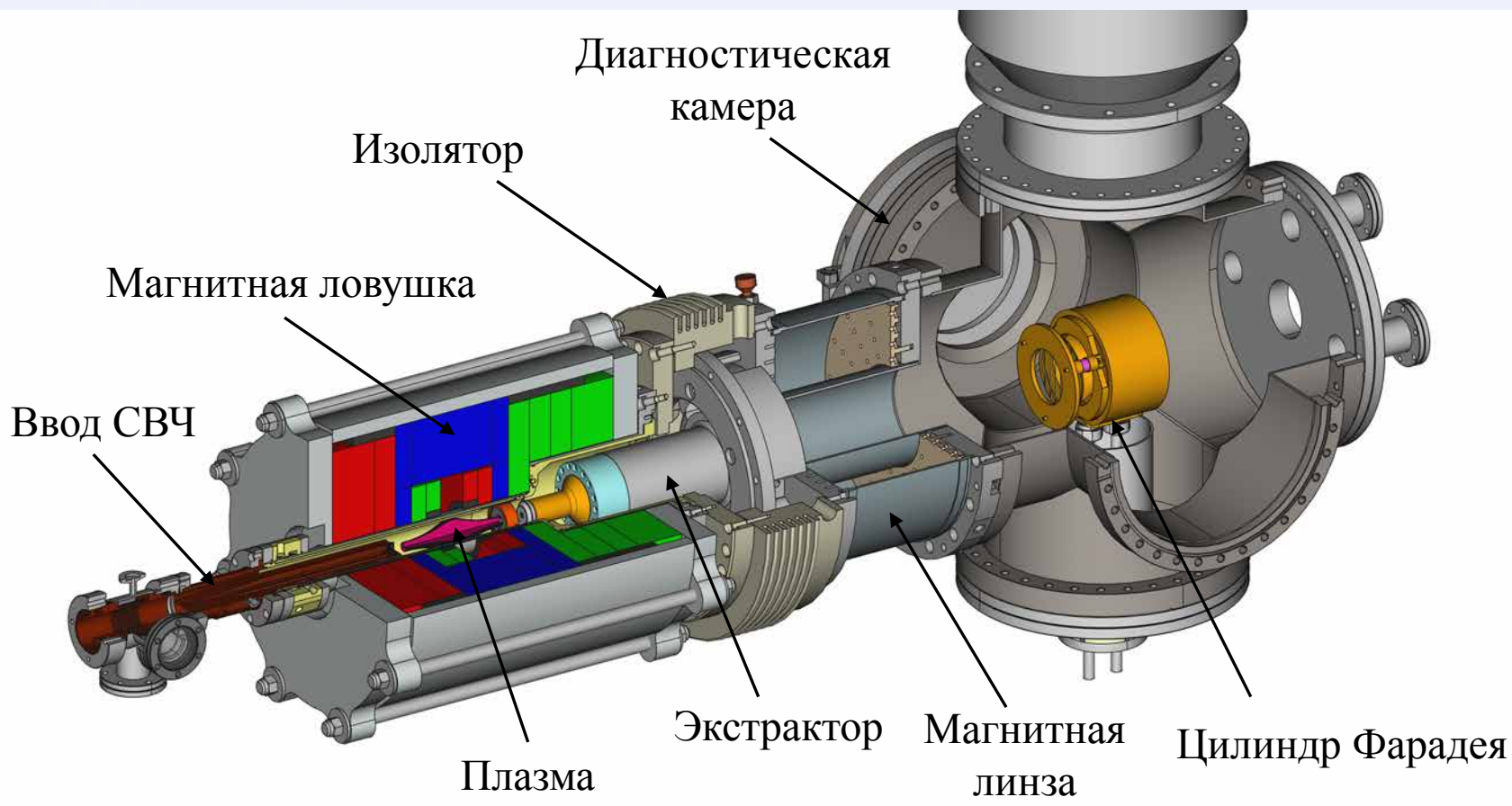
Gyrotron: 28 GHz/10 kW  
 Operation: CW or pulsed  
 Permanent magnet trap with 1.5 T



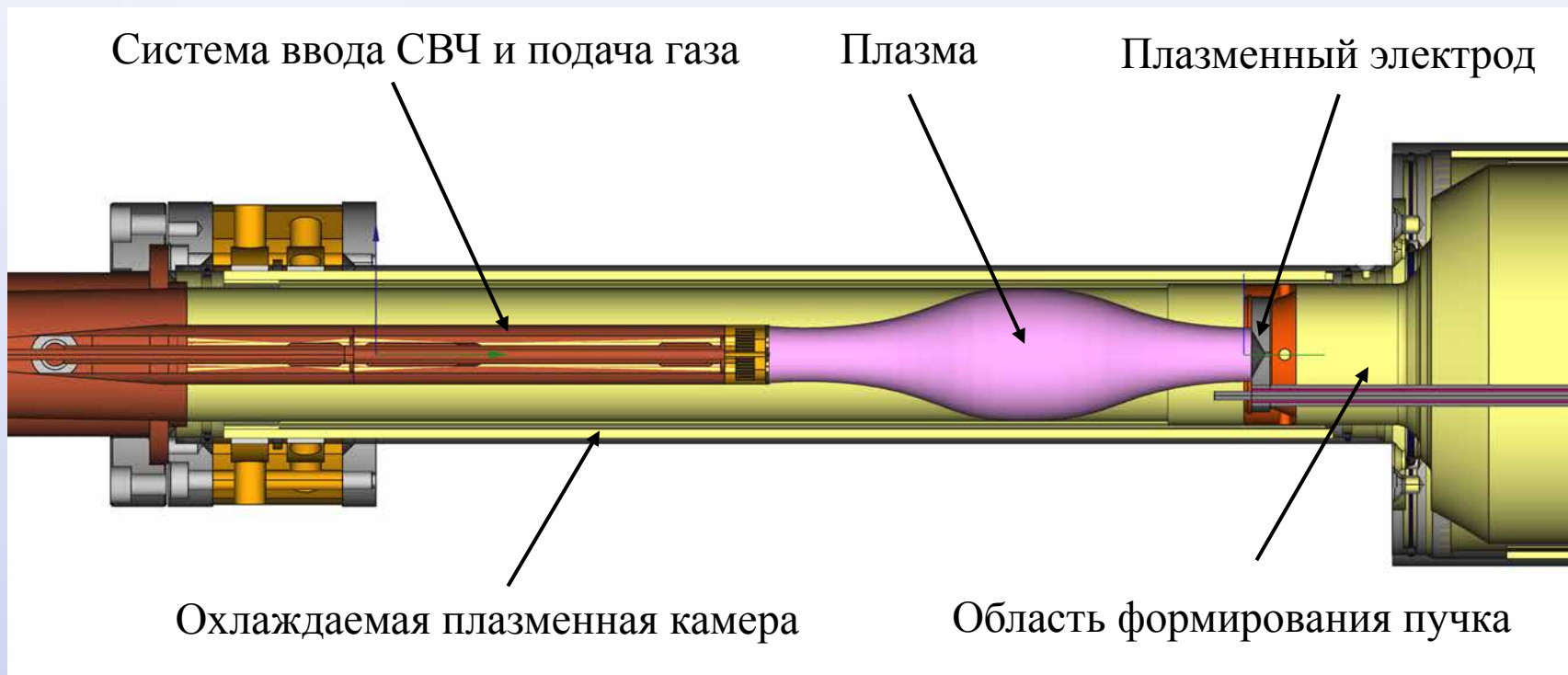
$$\begin{array}{lll}
 N_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3} & V_p \sim 40 \text{ cm}^3 & Q \sim 250 \text{ W/cm}^3 \\
 T_e \sim 10\text{-}50 \text{ eV} & \tau_e \sim 10 \mu\text{s} & J \sim 1.5 \text{ A/cm}^2
 \end{array}$$



# Конструкция GISMO

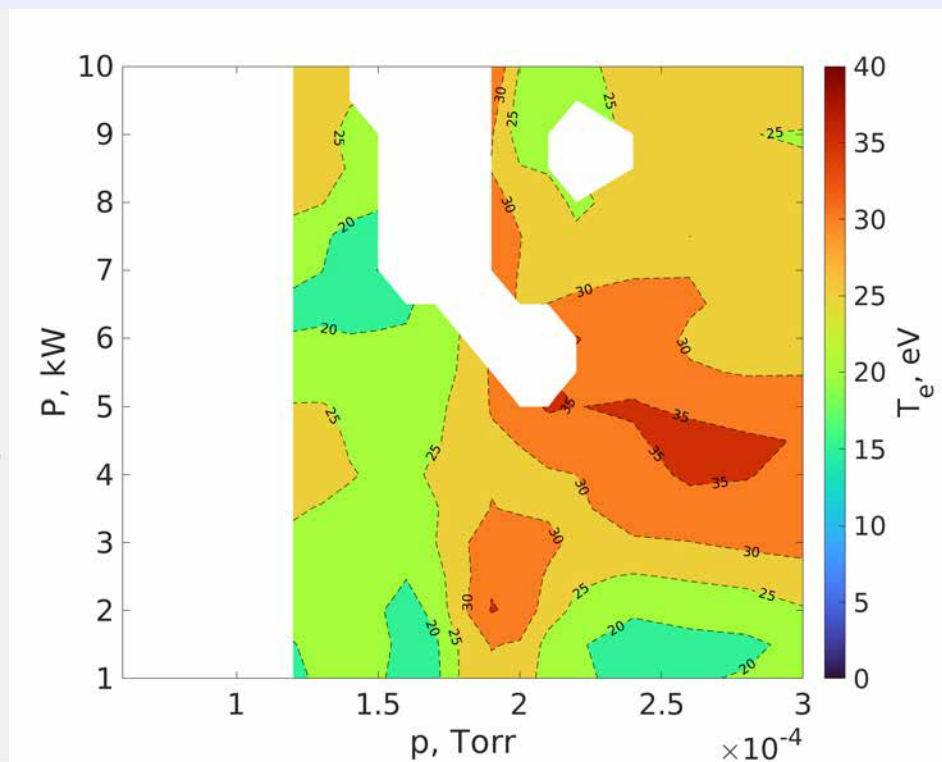
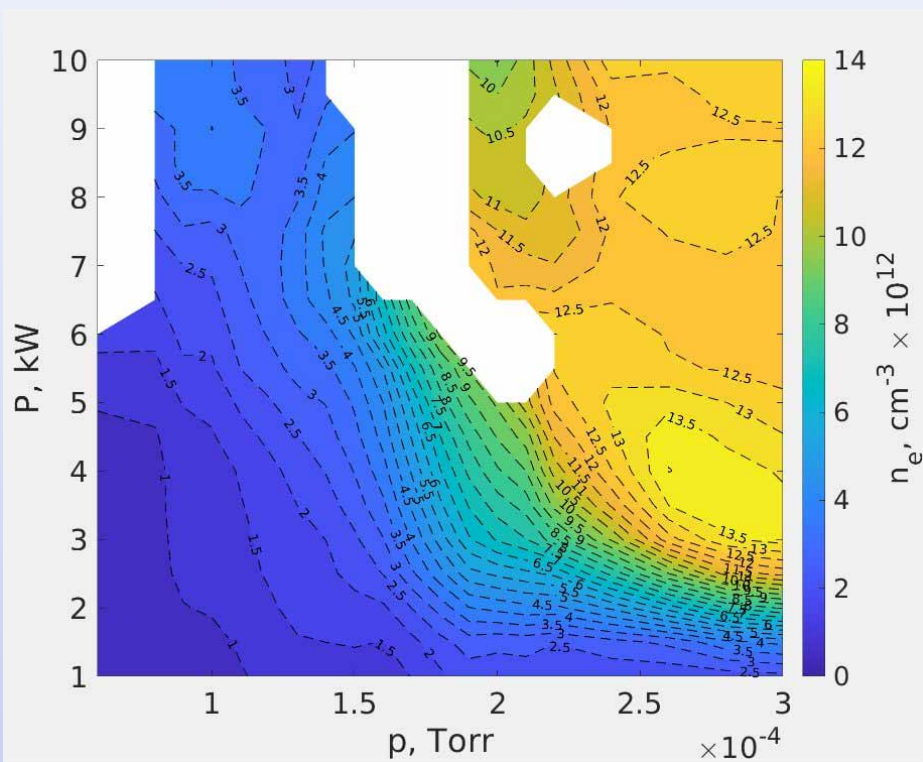


# Плазменная камера GISMO

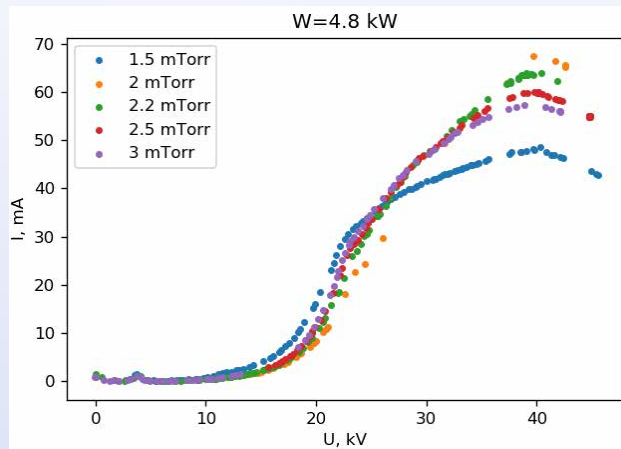


Мощность нагрева до 10 кВт  
 Объем плазмы менее 40 см<sup>3</sup>  
 Удельный энерговклад 250 Вт/см<sup>3</sup>

# Параметры плазмы в ЭЦР разряде

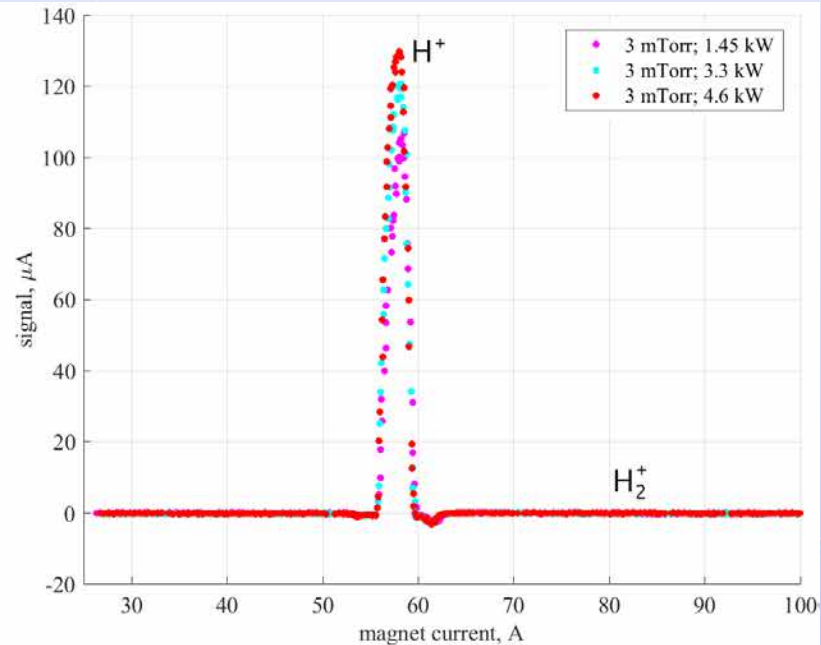
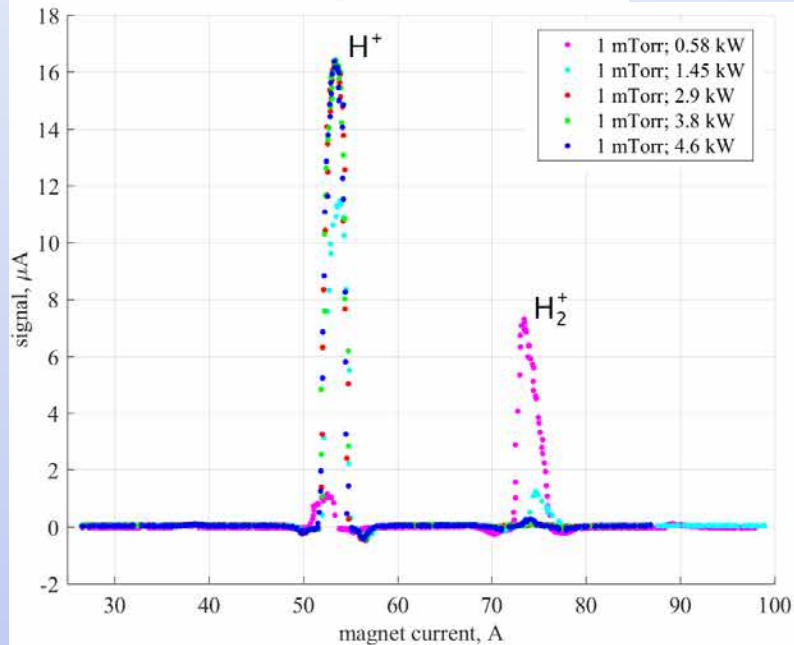


# Получение чистого протонного пучка на GISMO

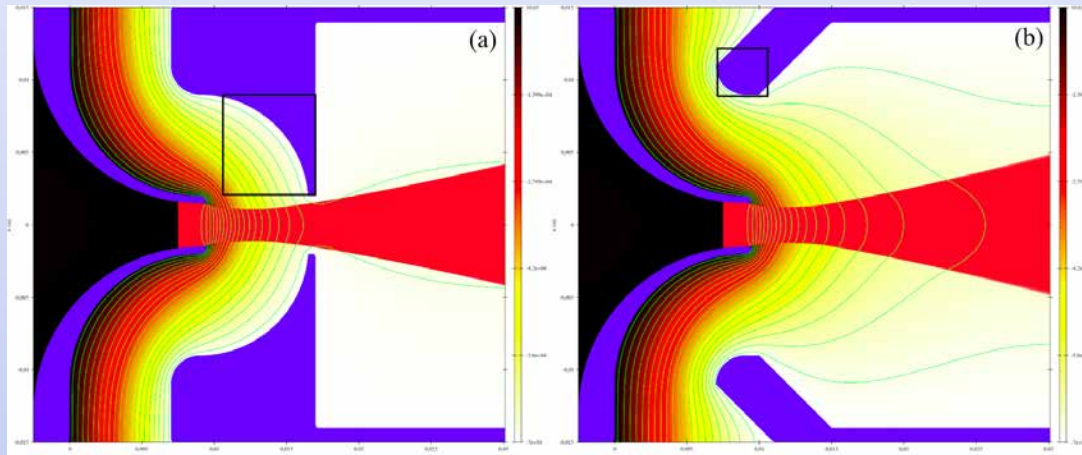
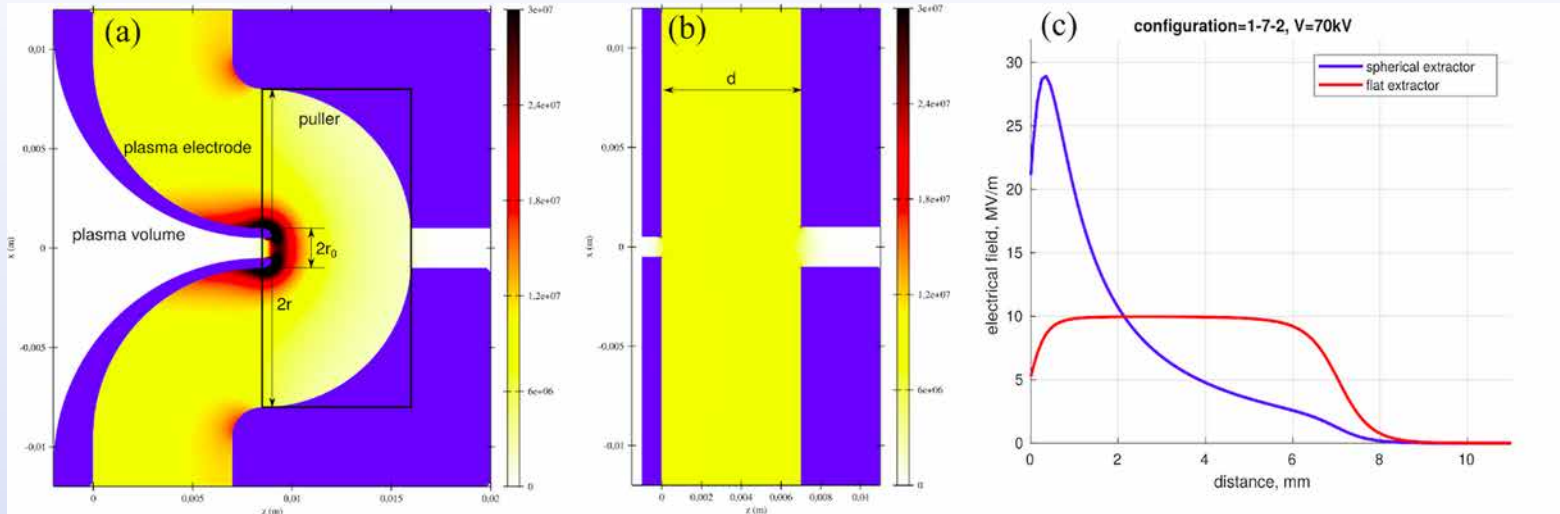


150 mA of pure protons was extracted using 4 mm extraction aperture ( $1,1 \text{ A/cm}^2$ )

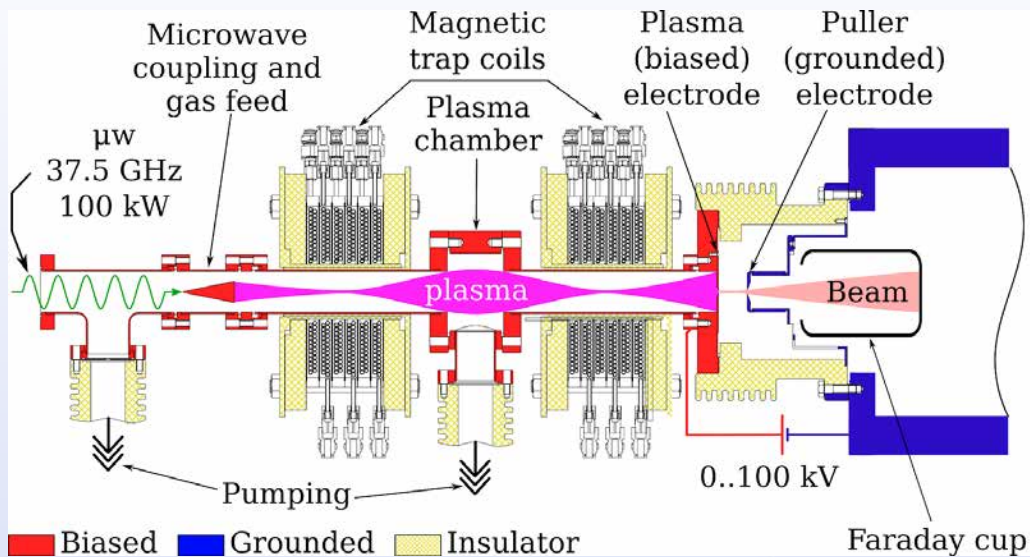
( $1 \text{ A/cm}^2$  of ion beam current density with high beam quality)



# Система формирования ионного пучка с неоднородным полем

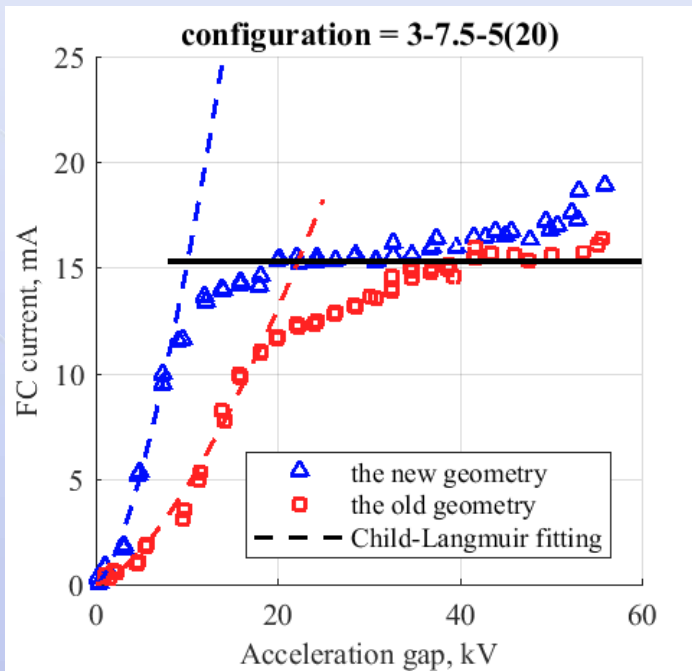
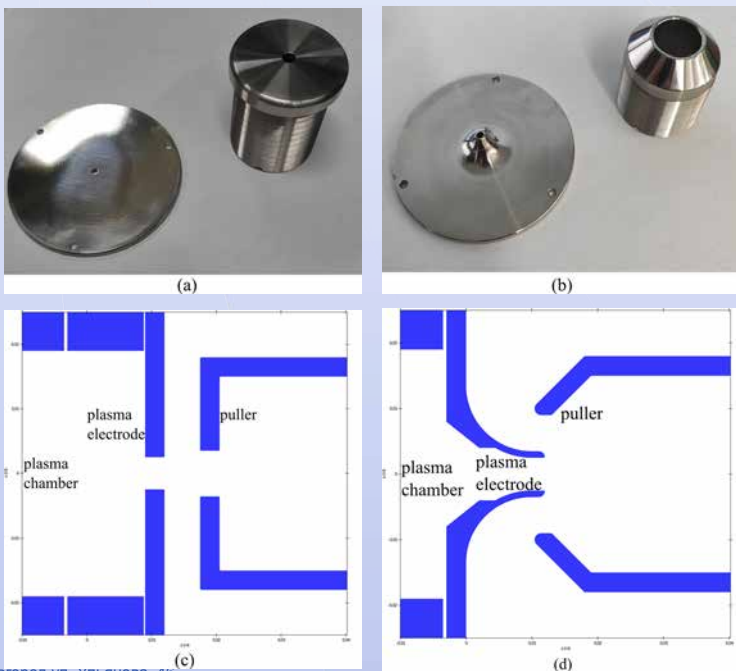


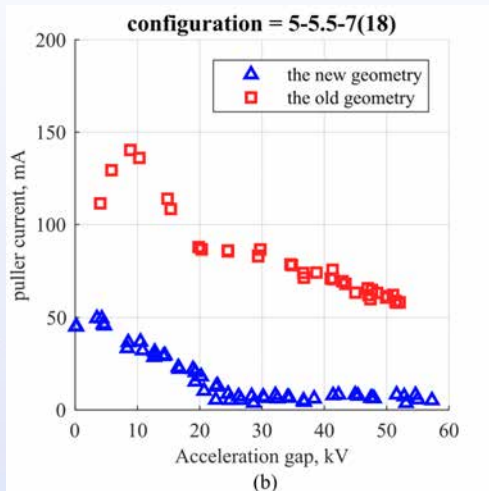
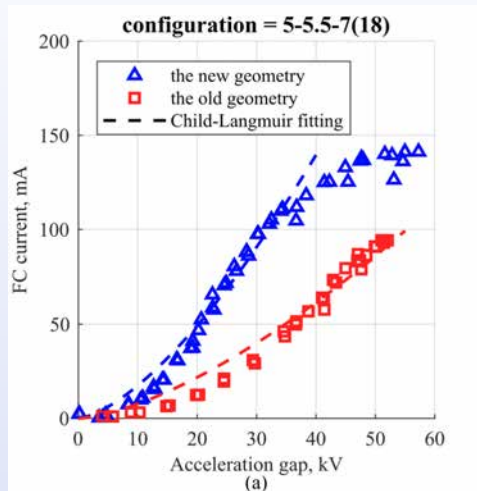
Структура электрического поля слабо чувствительна к геометрии пуллера (заземленного электрода)



На установке SMIS 37 продемонстрирована эффективность новой системы экстракции в экспериментах по формированию протонных пучков

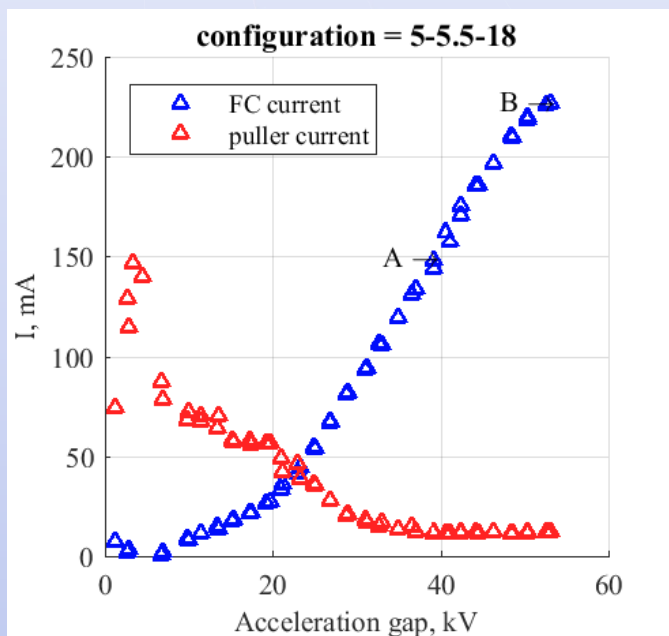
Продемонстрировано существенное снижение оптимального напряжения





Продемонстрирована защита пуллера от попадания ионного пучка

И повышенная электропрочность ускоряющего зазора



Получены ионные пучки с рекордной плотностью тока на уровне  $1,2 \text{ A/cm}^2$

230 мА через отверстие диаметром 5 мм

Характеристики источника	Ионный источник				
	SILHI (IFMIF)	SILHI (FAIR)	PS-ESS (ESS)	PMECRS (PKUNIFTY)	GISMO / SMIS 37
Тип иона и его доля в пучке	D+ (90%)	H+ (>80%)	H+ (78%)	D+ (81%)	H+, D+ (100%) / H+, D+ (94%)
Извлекаемый ток протонов (мА)	140	100	75	60	150 / 500
Начальная плотность тока (мА/см <sup>2</sup> )	140	<200	190	260	1200 / 800
Энергия пучка (кэВ)	100	95	75	50	30-100
Эмиттанс (π мм мрад)	0.2	0.25	0.18	0.12	0.1 (SMIS 37)
Режим работы (длительность импульса/период)	Непрерывный	Импульсный (5 мс/4 Гц)	Импульсный (2.86 мс/14 Гц)	Импульсный (1 мс/100 Гц)	Непрерывный и импульсный / Импульсный (0.1 Гц / 1 мс)



- Относительно простое согласование СВЧ излучение с плазмой в условиях ЭЦР
- Возможность повышения удельного энерговклада путем уменьшения объема плазменного образования
- Высокая плотность плазмы
- Высокая энергия электронов, возможность оптимизации процессов ионизации
- Рекордные для непрерывного режима горения плотности тока
- Уникальные возможности по управлению составом пучка, получение «чистых» протонных (дейтронных) пучков
- Потенциальная возможность использования одного ионного источника для разных сортов ионов, в том числе многозарядных

## DARIA

neutron source Dedicated to **A**ppplied **R**esearch and **I**ndustrial **A**pplications



ИФМ  
УрО РАН

Специализированная лаборатория для исследований на компактном нейтронном генераторе



спбгу

- Элементы нейтронных каналов
- Методики нейтронных исследований
- Обучение специалистов по нейтронным исследованиям

- Координация проекта
- Прототипы резонаторов RFQ и DTL – основы нейтронного генератора

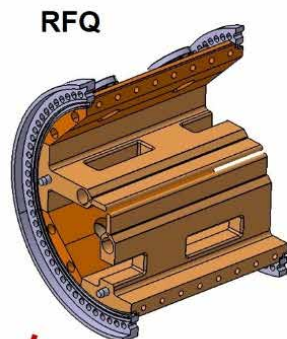


Диагностика пучка протонов



Протонный ЭЦР источник

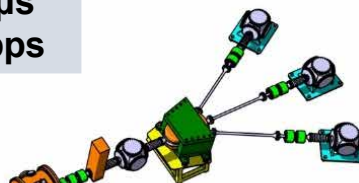
ЭЦР источник



RFQ

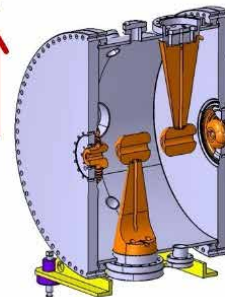
13MeV  
100mA  
100μs  
100pps

Мишенные камеры



БФУ им. Э.Канта

Прототип бериллиевой мишени

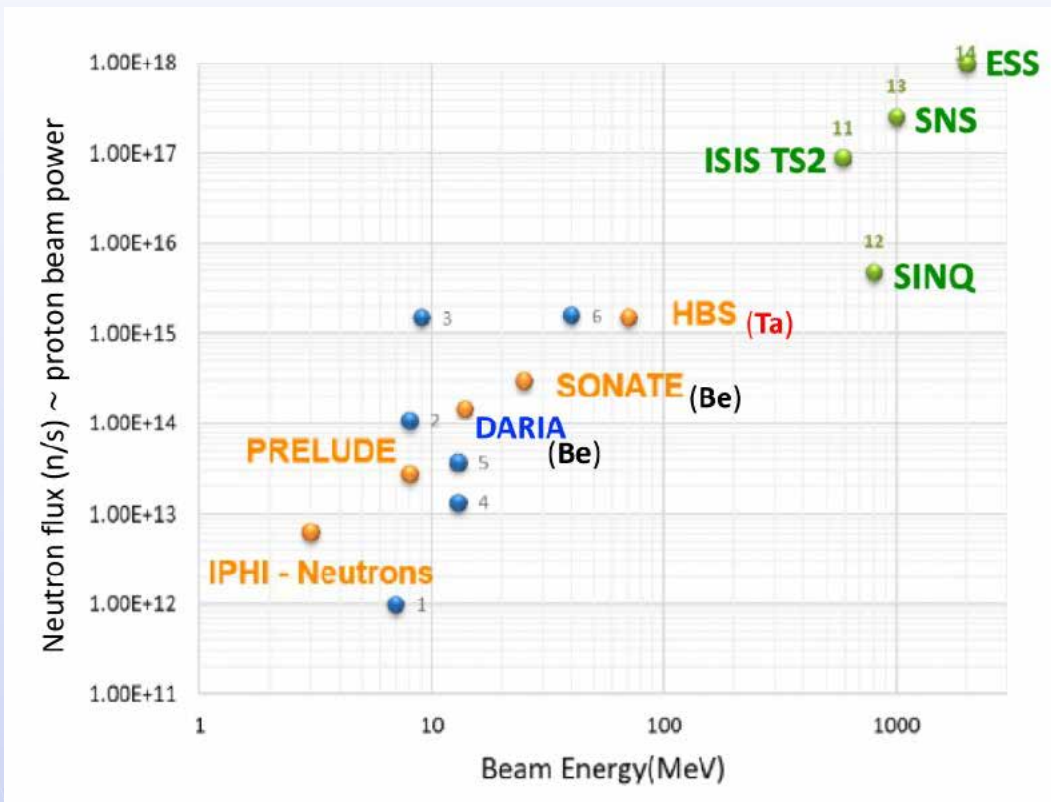


DTL





# Компактные нейтронные источники



Название	LENS, США	CPHS, Китай	NOVA ERA, Германия	HBS, Германия
E, MeV	13	13	10	70
I, mA	20	50	1	100
P, kW	3	16.3	10	100



# Тестовые измерения эмиттанса пучка Совместно с ИТЭФ (Лаборатория ускорителей)

T.V. Kulevoy, G.N. Kropachev, A.L. Sitnikov

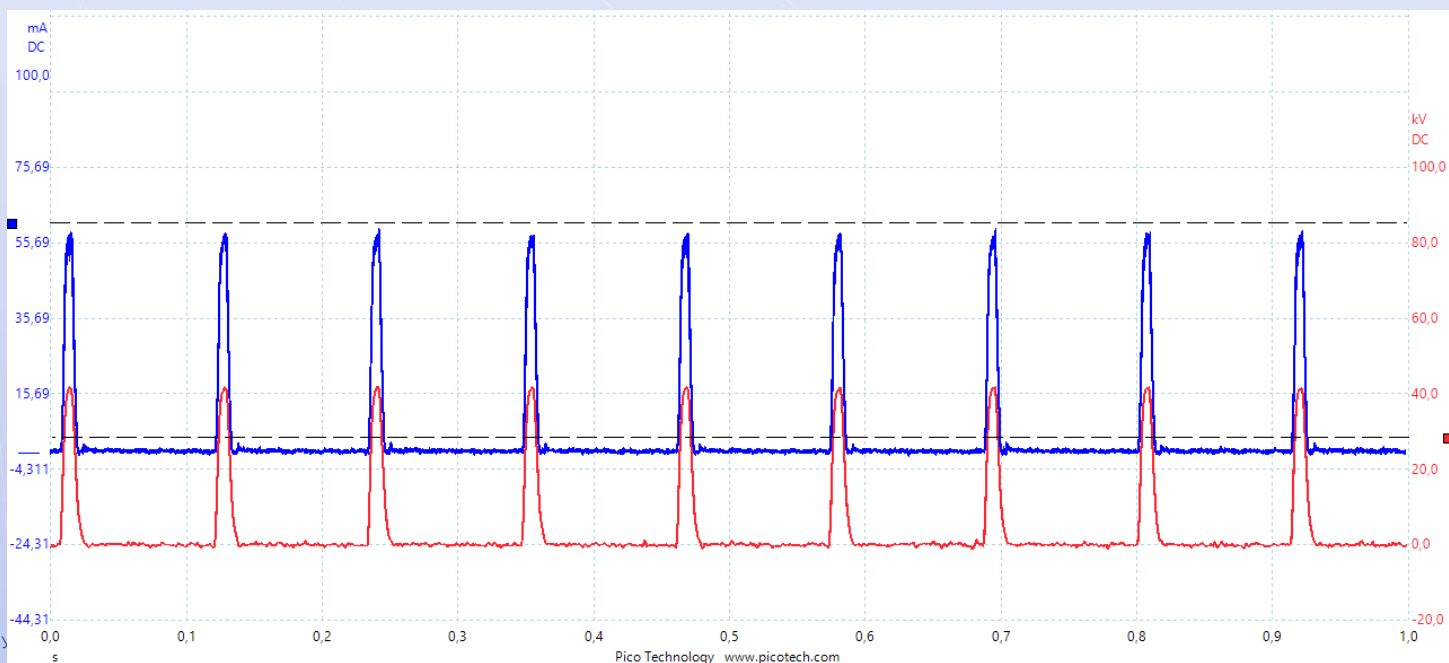
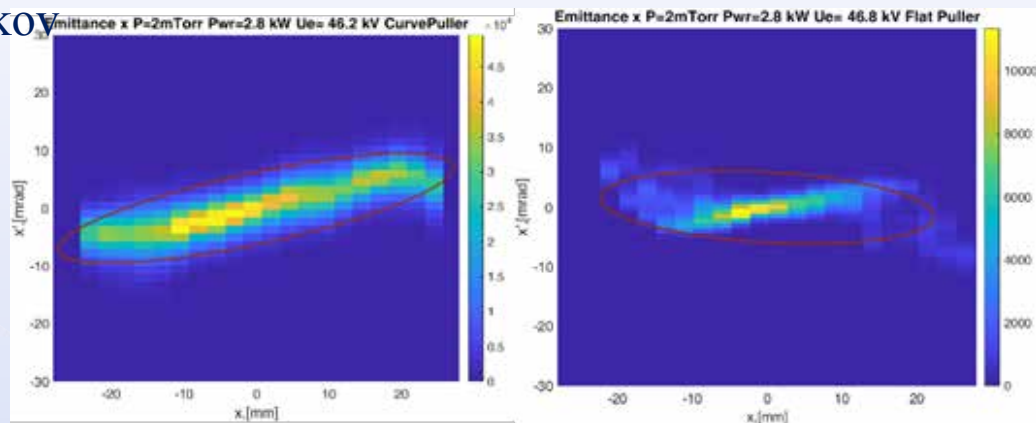
## DARIA requirements:

Beam current 70-100 mA

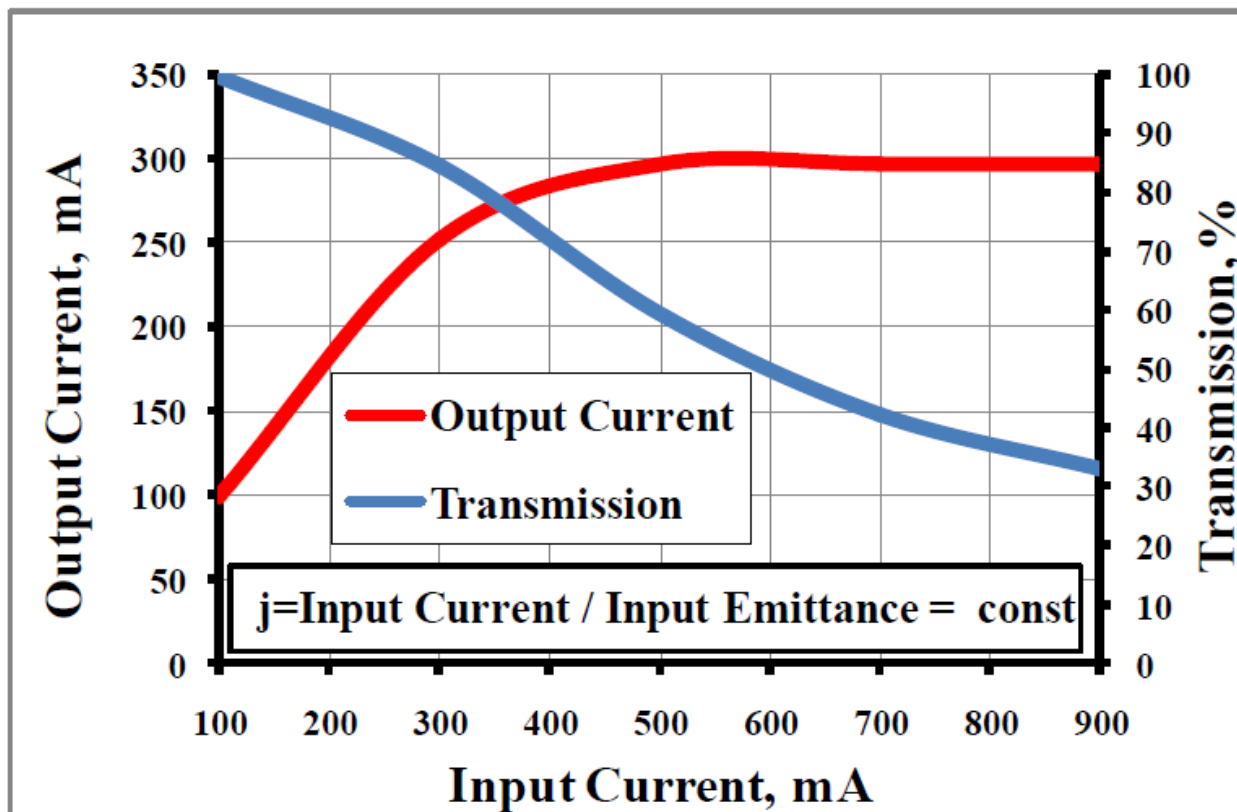
Normalized 4 RMS emittance  $< 2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$

Pulse duration 100  $\mu\text{s}$

Repetition rate 100 Hz

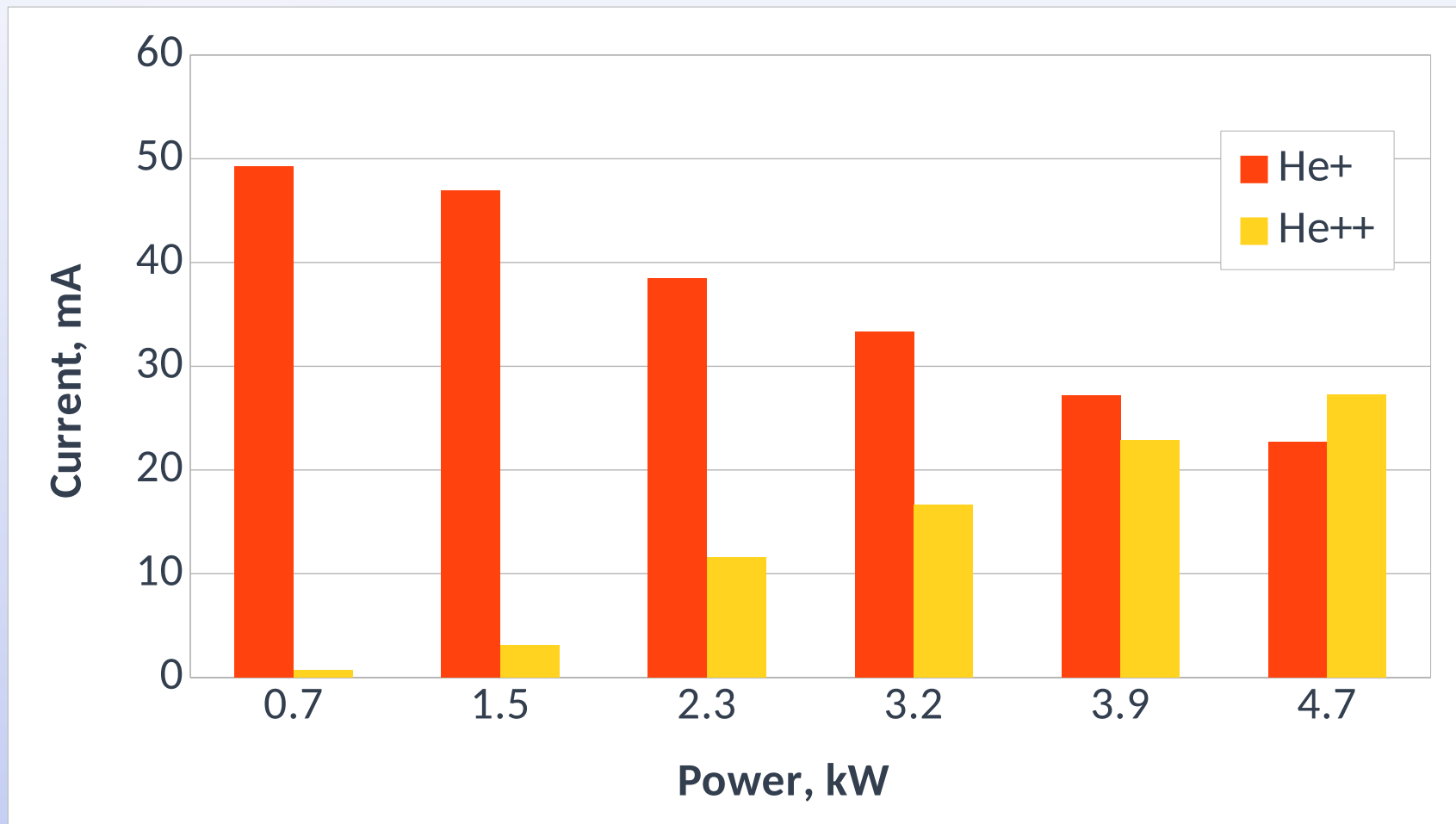


## Зависимость ускоренного тока и трансмиссии от входного тока пучка



Перспектива повышения среднего выхода нейтронов на Дарье в 30 раз???

## Сильноточные пучки ионов умеренного заряда

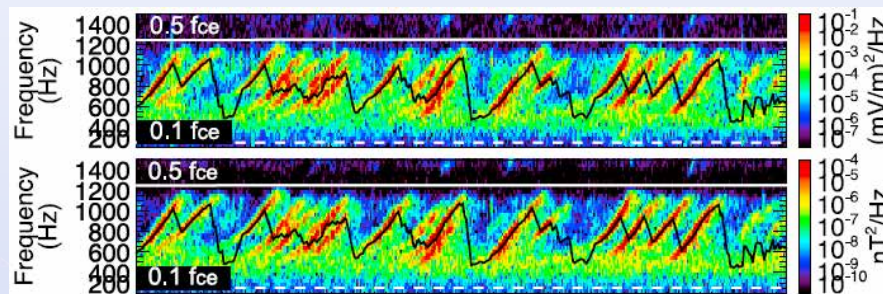


# Лабораторное моделирование астрофизических явлений

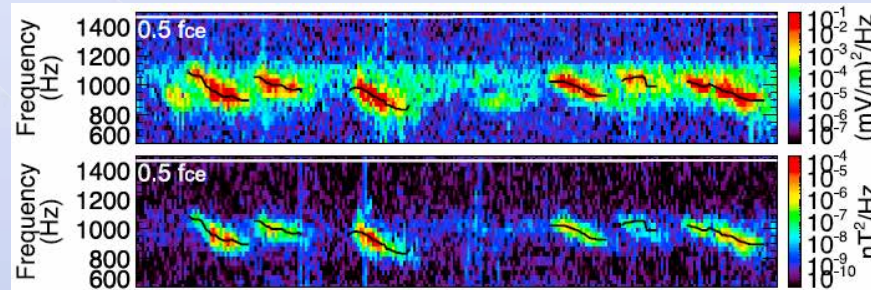


## Хоровые излучения в магнитосфере Земли

THEMIS D spacecraft (raising tone)



THEMIS E spacecraft (falling tone)



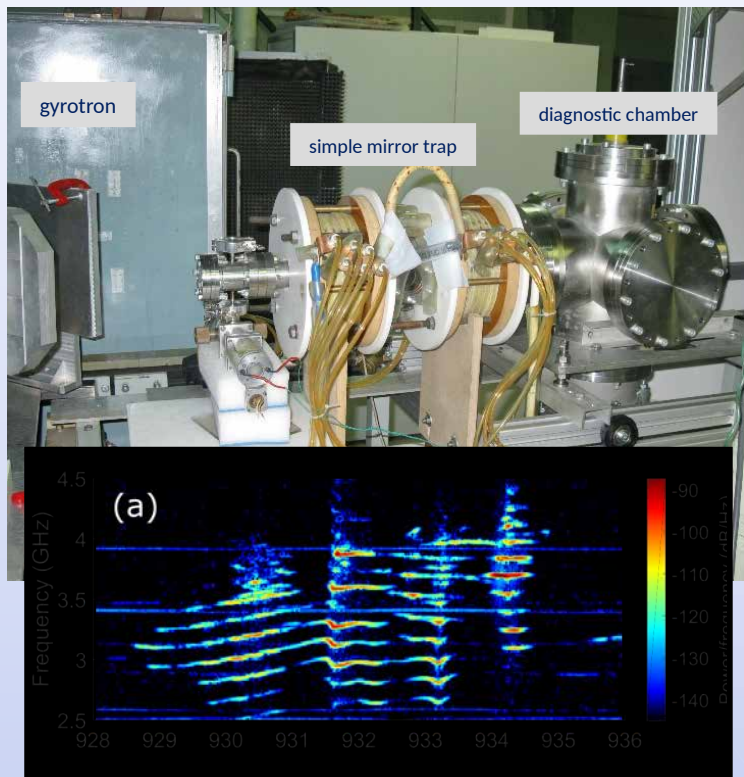
Условие циклотронного резонанса:

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = s \omega_{ce} / \gamma$$

W. Li et al., Geophys. Res. Lett., **38**, L14103, 2011

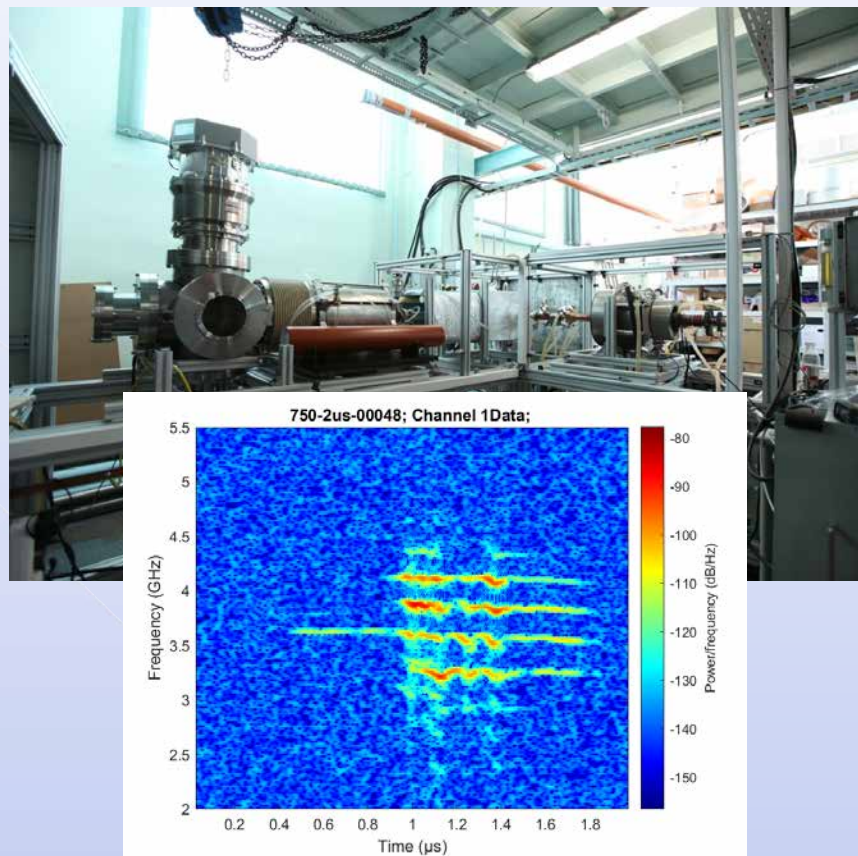
## SMIS 37

Импульсный режим работы  
Нагрев на частоте 37.5 ГГц

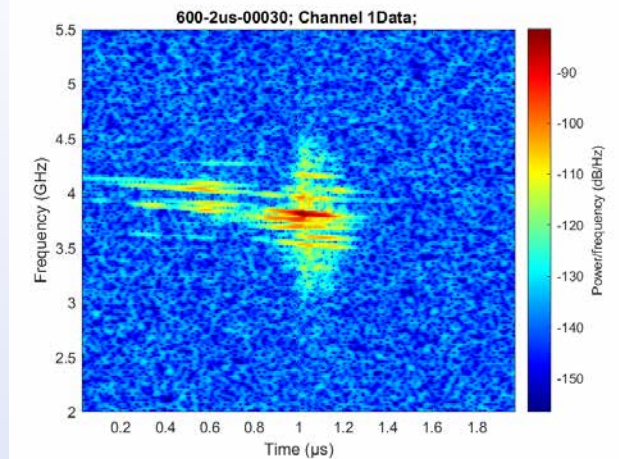
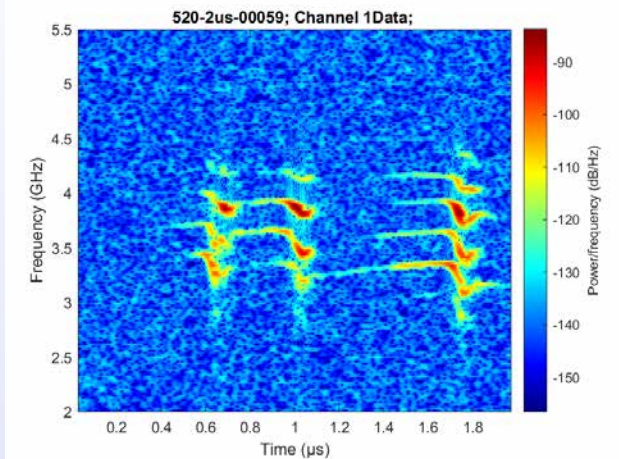
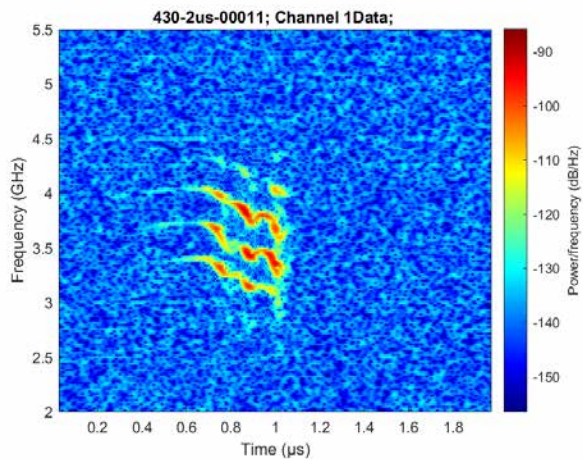


## GISMO

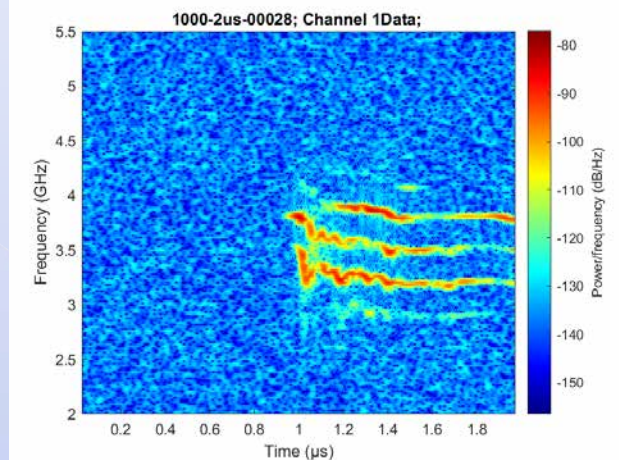
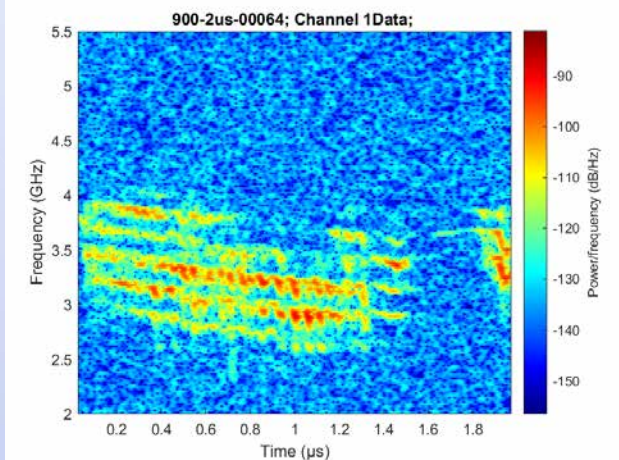
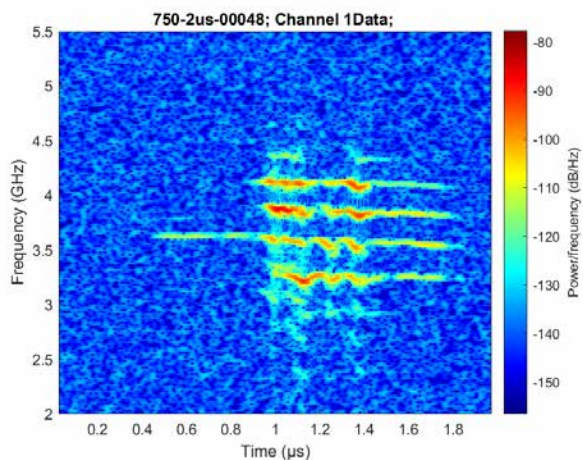
Непрерывный режим работы  
Нагрев на частоте 28 ГГц







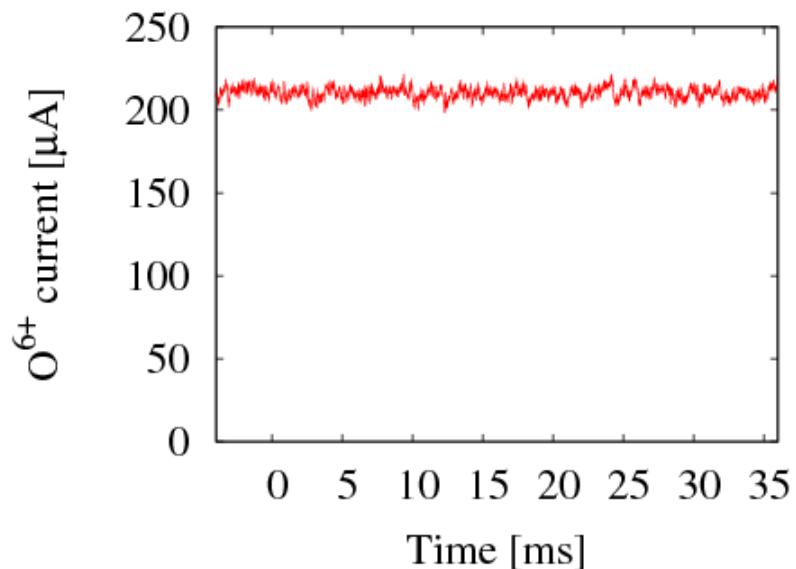
$p_0 = 2$  mTorr



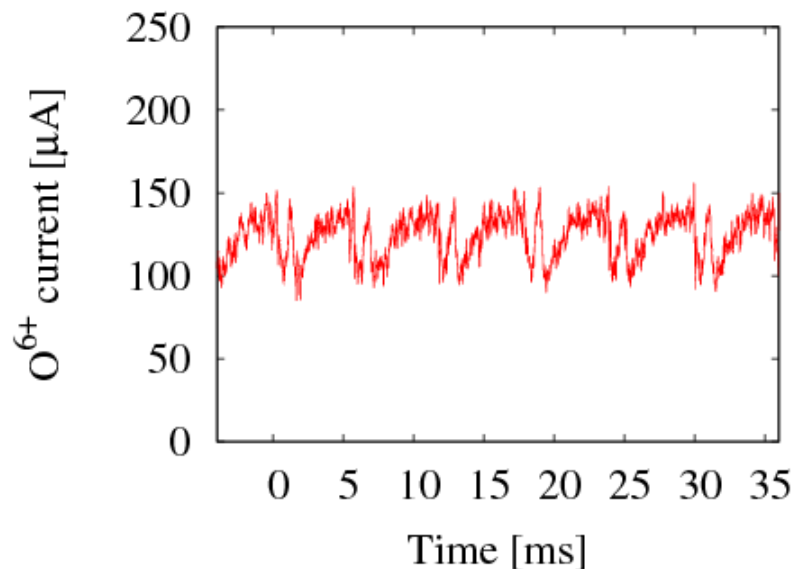
# Ограничивающие факторы в ЭЦР ионных источниках

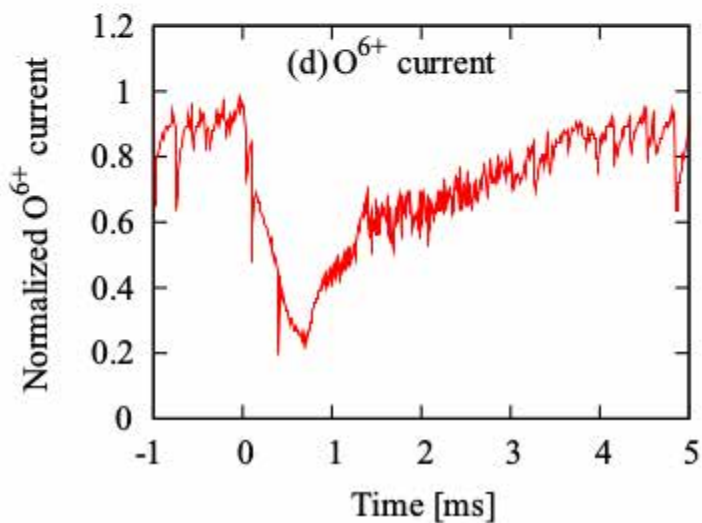
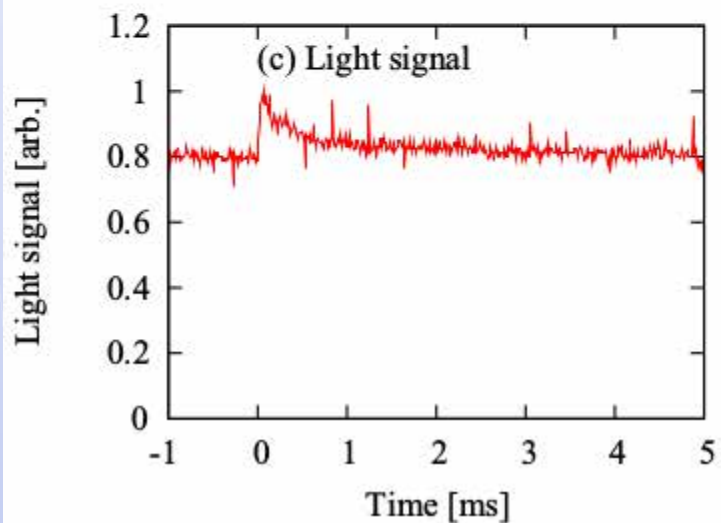
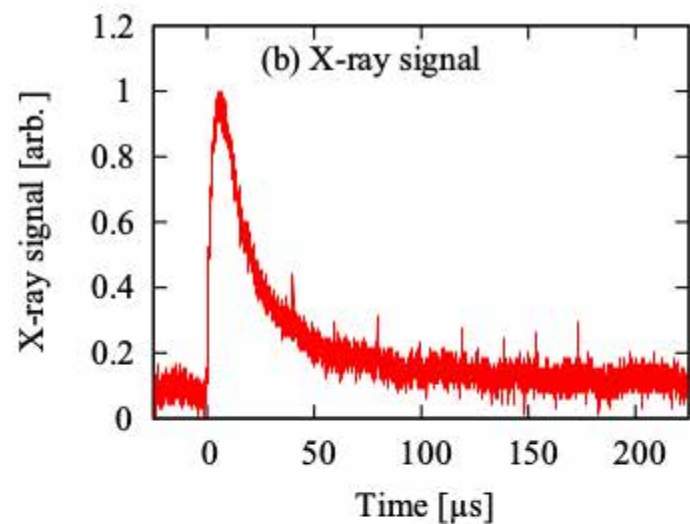
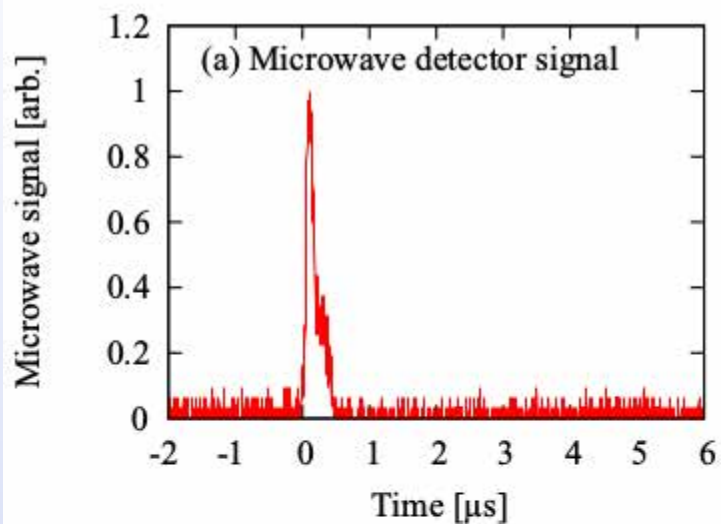
Анализ поведения тока пучка на источнике  
JYFL 14 GHz A-ECR

При нагреве ниже порога по мощности

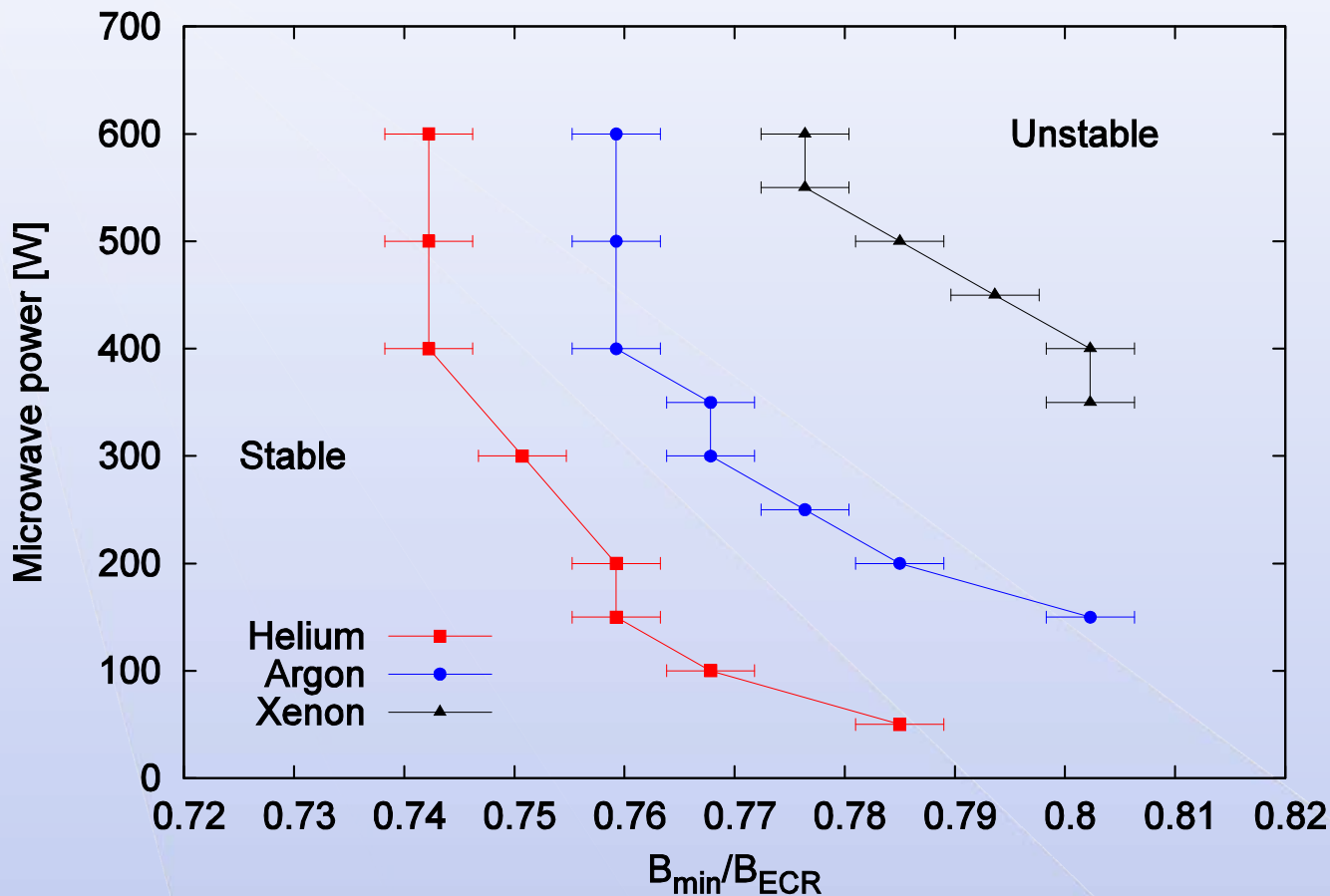


При нагреве выше порога по мощности





# Границы стабильной работы источника



Спасибо за внимание!