



ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

XX ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ 2023 г.

18.09.2023 – 22.09.2023

Гостинично-оздоровительный комплекс «Сочи Парк Отель»

г. Сочи

[РЕГИСТРАЦИЯ](#)

Проектный центр ИТЭР

ФТИ им.Иоффе

ИЯФ СО РАН

МИФИ

Курчатовский институт

Институт прикладной физики им. Гапонова-Грехова

Санкт-петербургский политехнический университет

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

ТРИНИТИ

МЭИ

НИИЭФА

ГКМП

НИКИЭТ

МФТИ

~ 200 участников

~ 100 докладов



Секции

1. Диагностика плазмы ИТЭР
2. Диагностика плазмы Токамака с Реакторными Технологиями (TRT)
3. Инженерные вопросы диагностики плазмы
4. Спектроскопия плазмы и лазерные методы диагностики
5. Корпускулярные методы диагностики
6. Микроволновые и субмиллиметровые методы диагностики
7. Системы сбора и обработка экспериментальных данных
8. «Первая стенка» и взаимодействие с плазмой

Круглый стол. Дискуссия по темам:

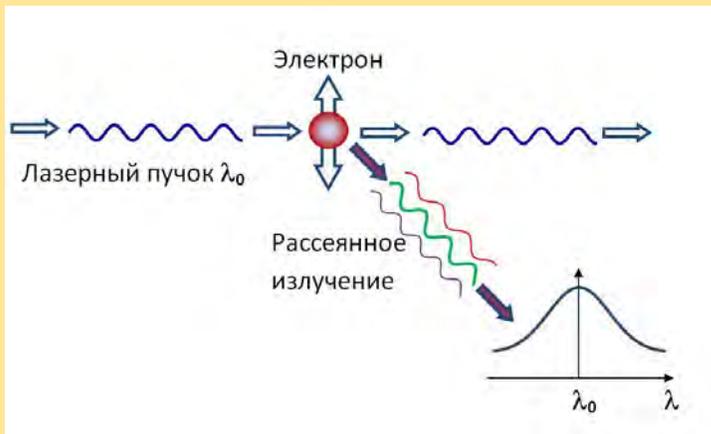
1. Замена бериллиевой облицовки на вольфрамовую в ИТЭР
2. Оптимальная облицовка для TRT

Первоочередные НИР по теме в рамках ФП№3 КП РТТН

Круглый стол

«Цифровое будущее термоядерных исследований в Российской Федерации»

Лазерное рассеяние



Томсоновское рассеяние света на свободных электронах

- определение локальной n_e по интенсивности сигнала
- определение локальной T_e по уширению линии

Мухин Евгений Евгеньевич (ФТИ им.Иоффе)

Комплекс диагностик томсоновского рассеяния на токамаке TRT

Ермаков Никита Владимирович (ФТИ им.Иоффе)

Диагностика томсоновского рассеяния дивертора токамака Глобус-М2

Жильцов Никита Сергеевич (ФТИ им.Иоффе)

Статус диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2

Панфилов Д.С. (Курчатовский институт)

Анализ возможности использования SWIR камеры в диагностике томсоновского рассеяния в токамаке Т-15МД

Статус диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М2

Жильцов Н.С.¹, Курские Г.С.¹, команда токамака Глобус-М2^{1, 2, 3, 4}

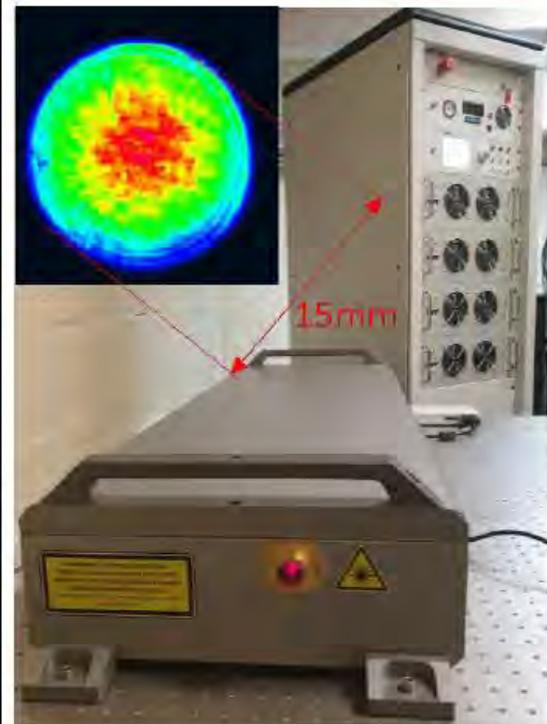
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

²НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Ленинградская обл., Гатчина

³АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Аппаратный комплекс диагностики ТР



11 фильтровых полихроматоров:

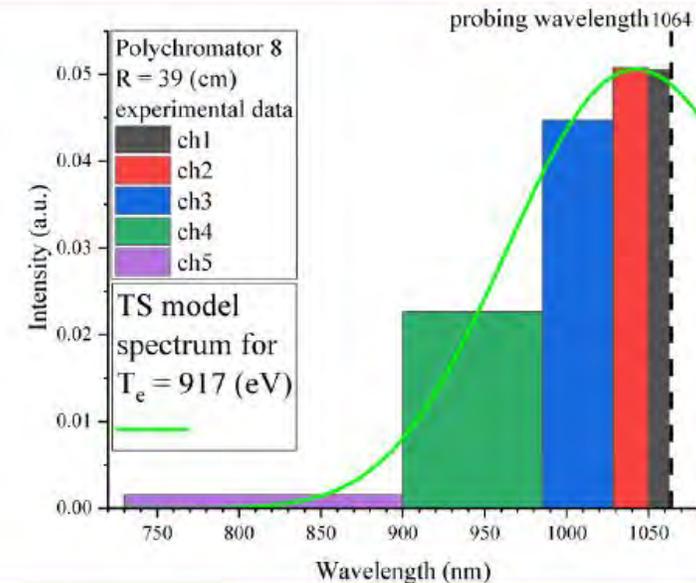
5 спектральных каналов
730 – 1060 (нм)

Детектор - ЛФД Ø1.5 (мм)
Полоса усилителя ≈200 (МГц)

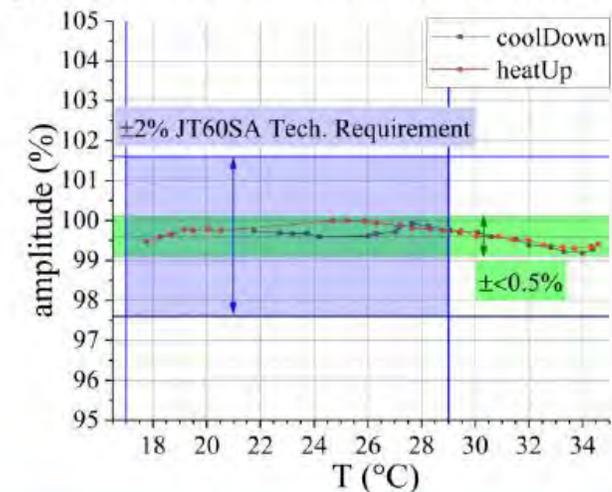
128 каналов CAEN V1743
частота 3.2(ГВыб/с)
разрешение 12 (бит)

64 канала АЦП 0.5(МГц) 16(бит)

ITER-grade лазер
Nd:YAG 1064.5±0.005 (нм)
Стационарный режим
330(Гц) импульсы
с энергией до 3 (Дж)



Поддержание КУ ЛФД ±0.5% для 18-34°C



N.S. Zhiltsov NIM 2020

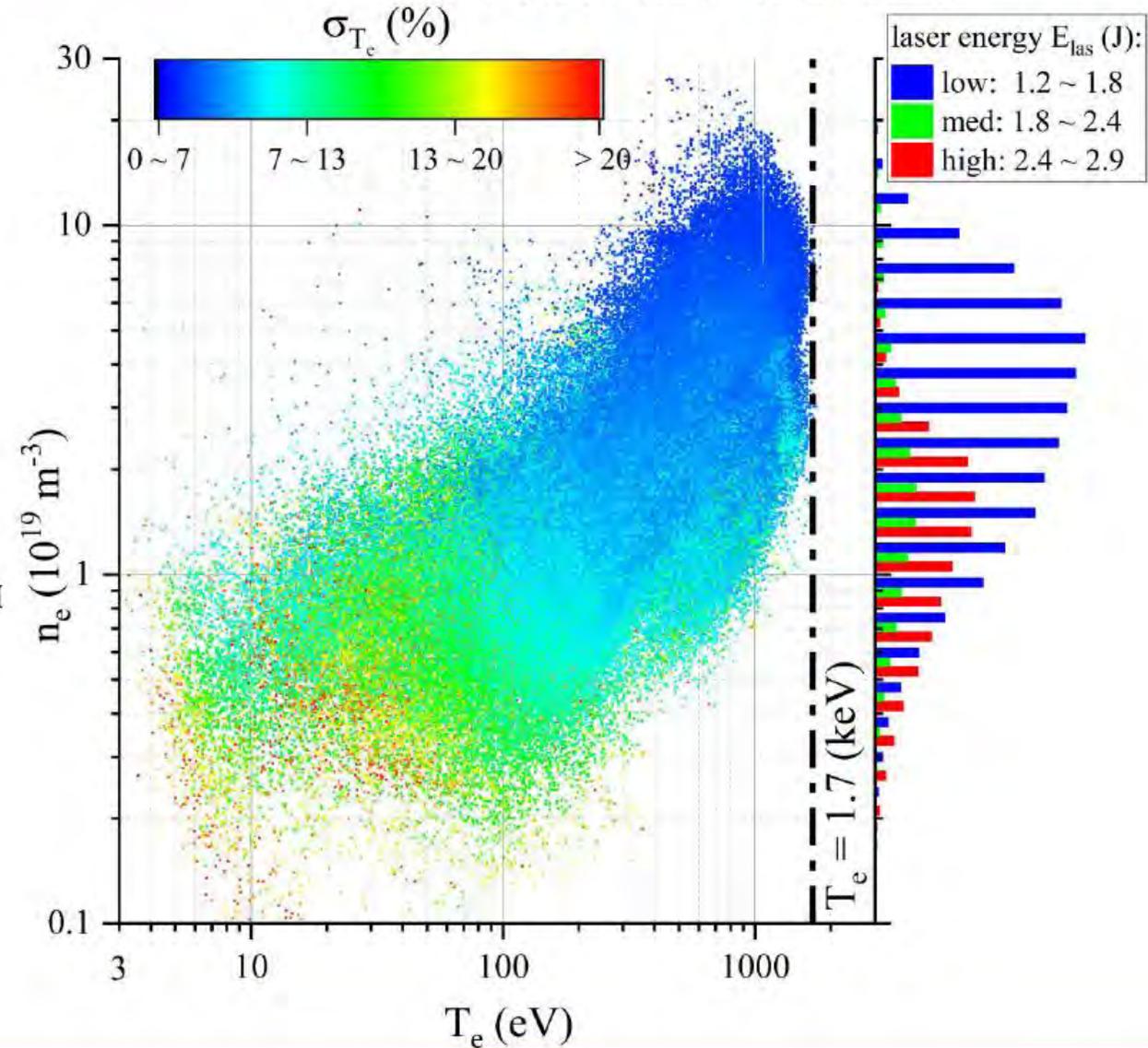
Globus-M2 #41095-43220

В компактной установке достигается $T_e = 1.7$ (кэВ) при $n_e = 10 \cdot 10^{19}$ (м⁻³)

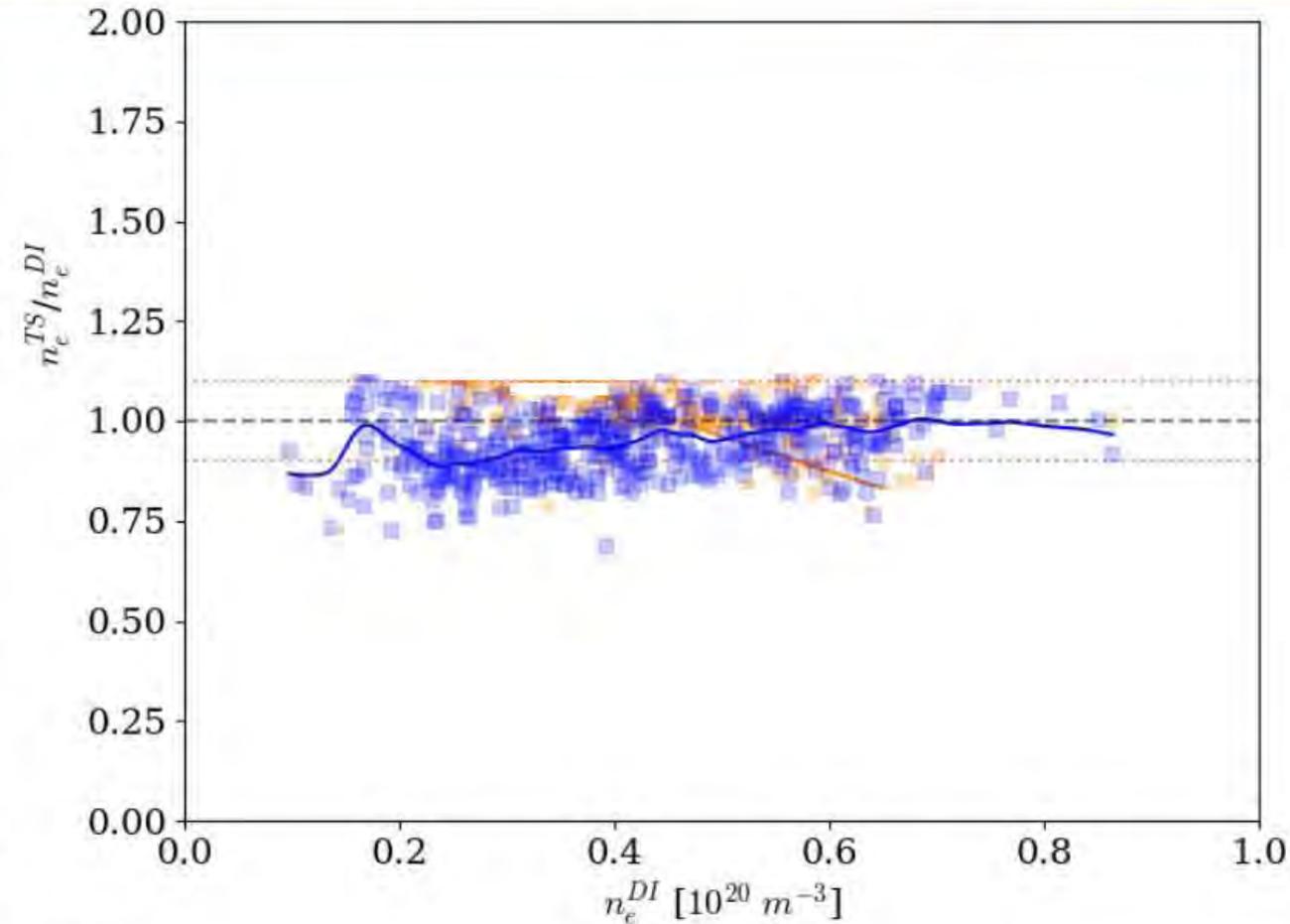
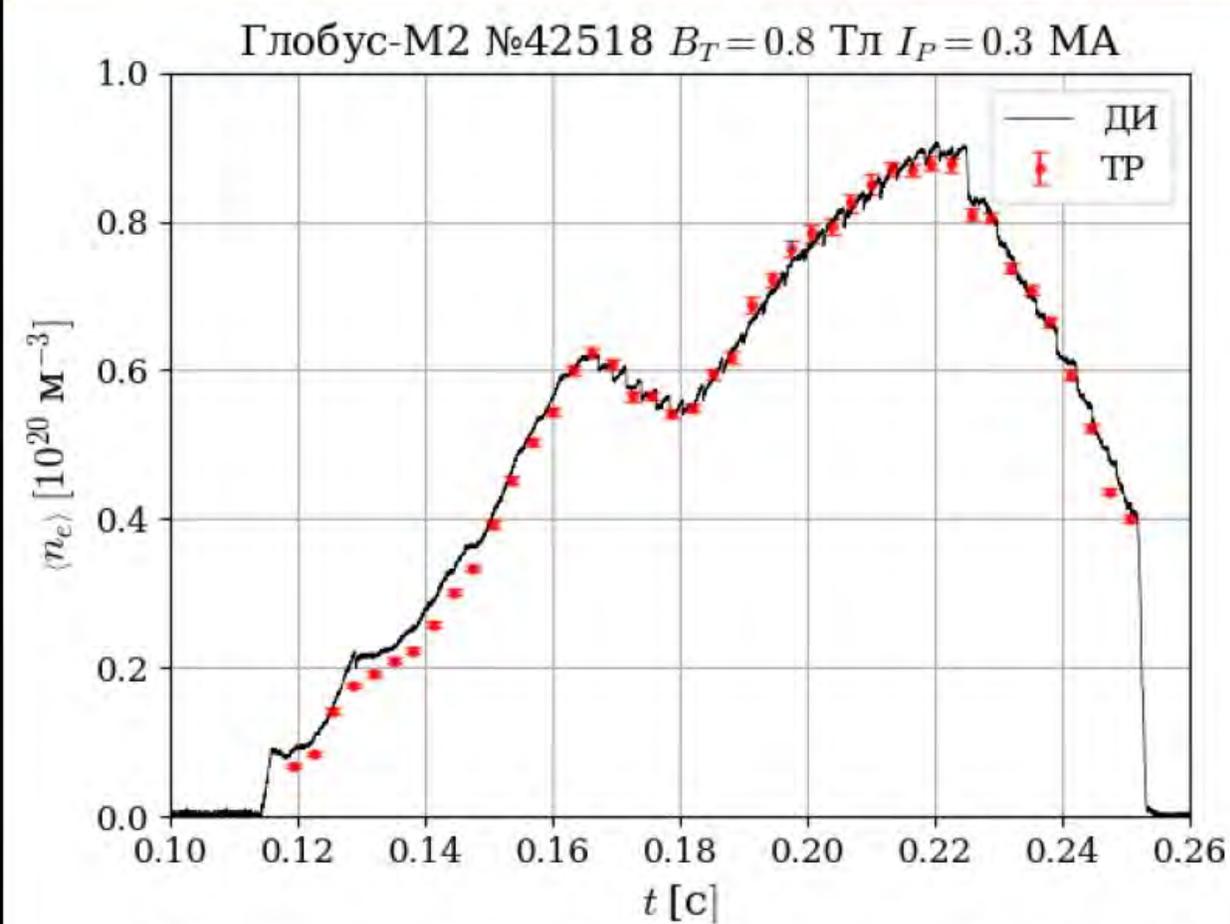
Диагностический комплекс используется в широком динамическом диапазоне:

$$0.005 < T_e < 1.7 \text{ (кэВ)}$$

$$0.2 < n_e < 20 \text{ (} 10^{19} \text{ м}^{-3}\text{)}.$$



Глобус-М2 №42518 $B_T = 0.8$ Тл $I_P = 0.3$ МА



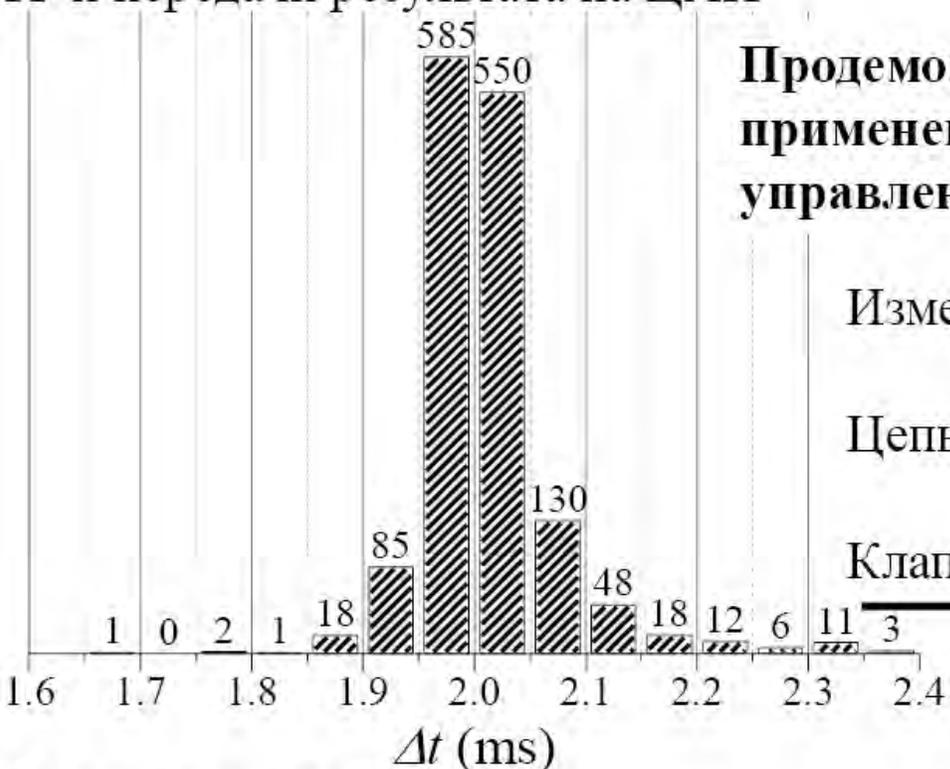
Абсолютная калибровка диагностики ТР верифицирована независимыми интерферометрическими измерениями.

[ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1](#)

Диагностика ТР в цепи управления токамаком

Гистограмма времени обработки данных ТР и передачи результата на ЦАП

Globus-M2, $I_p=0.2$ (MA), $B_T=0.7$ (T), OH
 #42611, without feedback
 #42613, TS feedback by H gas puff



Продemonстрировано применение данных ТР для управления токамаком

Измерение n_e методом ТР

Цепь обратной связи

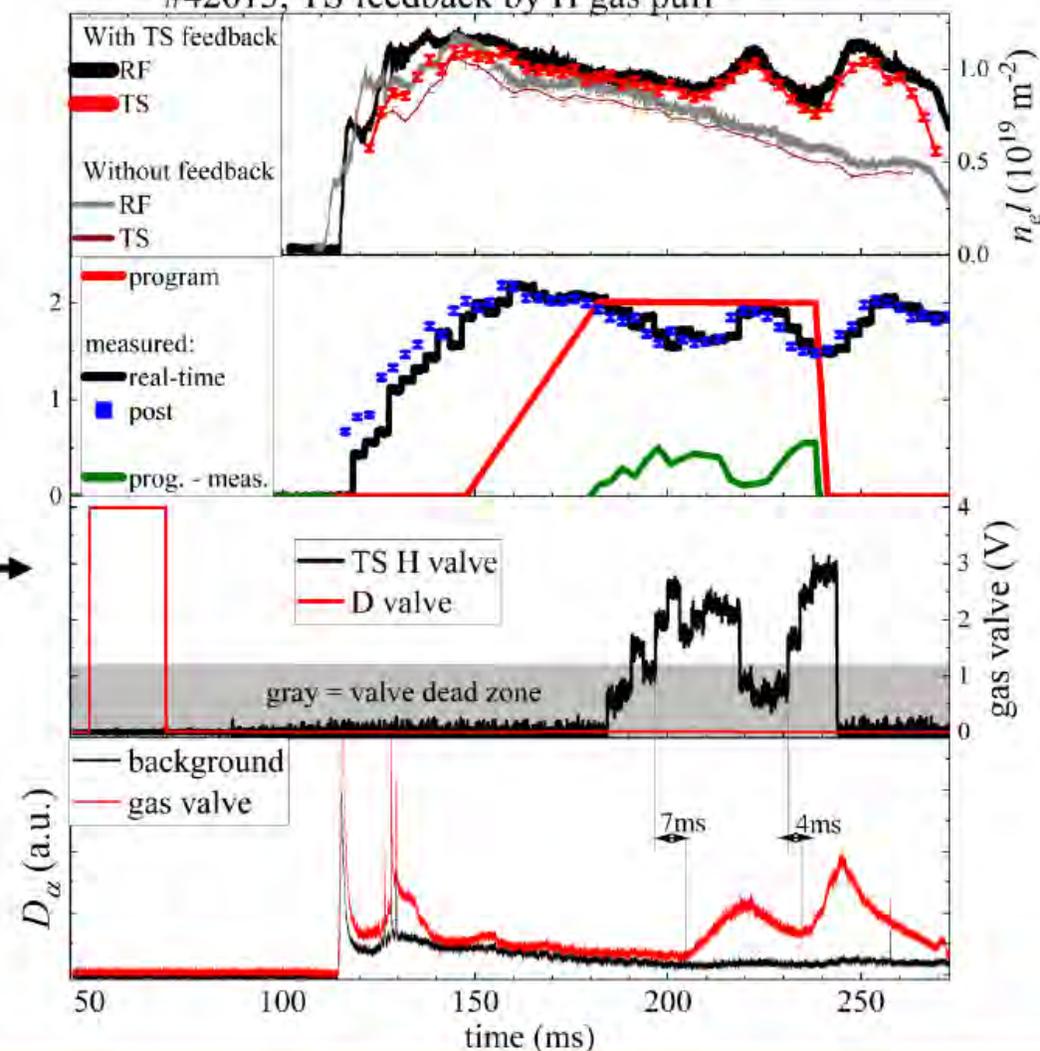
Клапан газонапуска

Среднее время = 2.0 (мс)

Выполнены требования к диагностике ТР ИТЭР:

Максимальное время < 2.4 (мс)

[Письма в ЖТФ, 2023, том 49, вып. 16](#)



КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИК ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ TRT (10:15-10:40)

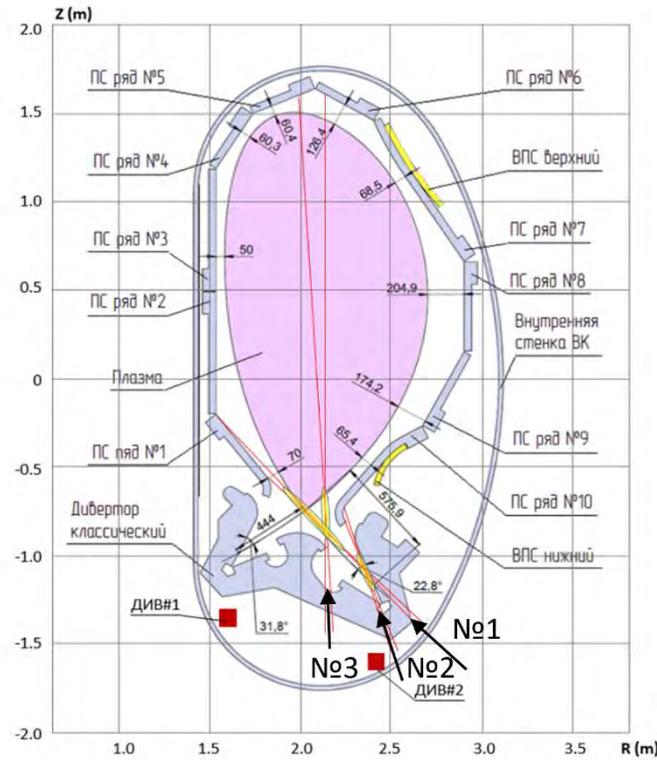
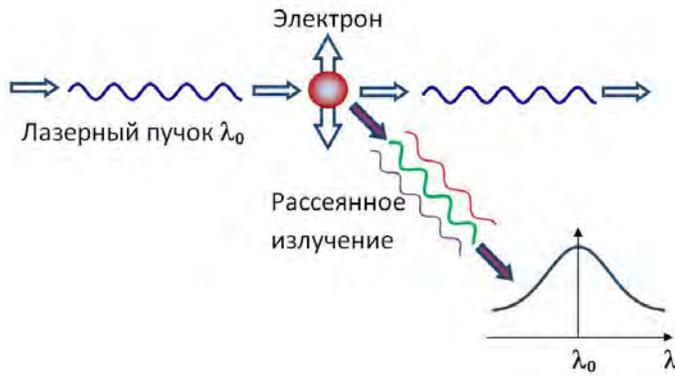
Е.Е.Мухин¹, С.Ю.Толстяков¹, Г.С.Курскиев¹, Н.С.Жильцов¹, Н.В.Ермаков¹, Д.Л.Богачев¹, А.Н.Коваль¹, В.А.Соловей¹, П.А.Панкратьев¹, Д.С.Самсонов¹,
И.Б.Терещенко¹, А.Г.Раздобарин¹, Л.А.Варшавчик¹, А.Ф.Корнев², П.В.Чернаков³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² ООО "Лазеры и оптические системы", Санкт-Петербург

³ АО "Спектрал-Тех, Санкт-

Петербург



Временное разрешение **10-100мс**
Пространственное разрешение **~10мм**

Центральная плазма ($-0.2 < r/a < 0.8$)

Параметр	Диапазон	Точность
$n_e [m^{-3}]$	$10^{19} - 3 \cdot 10^{20}$	$\delta n_e < 5\%$
$T_e [keV]$	0.2 – 25	$\delta T_e < 10\%$

Краевая плазма ($0.8 < r/a < 1.1$)

Параметр	Диапазон	Точность
$n_e [m^{-3}]$	$5 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{20}$	$\delta n_e < 5\%$
$T_e [keV]$	0,025 – 10	$\delta T_e < 10\%$

Диверторная плазма (в наружной ноге)

Параметр	Диапазон	Точность
$n_e [m^{-3}]$	$10^{19} - 10^{22}$ (10^{21})	$\delta n_e < 5\%$
$T_e [eV]$	0,3 – 100 (100eV-10keV)	$\delta T_e < 10\%$

Диверторная плазма (в X-точке)

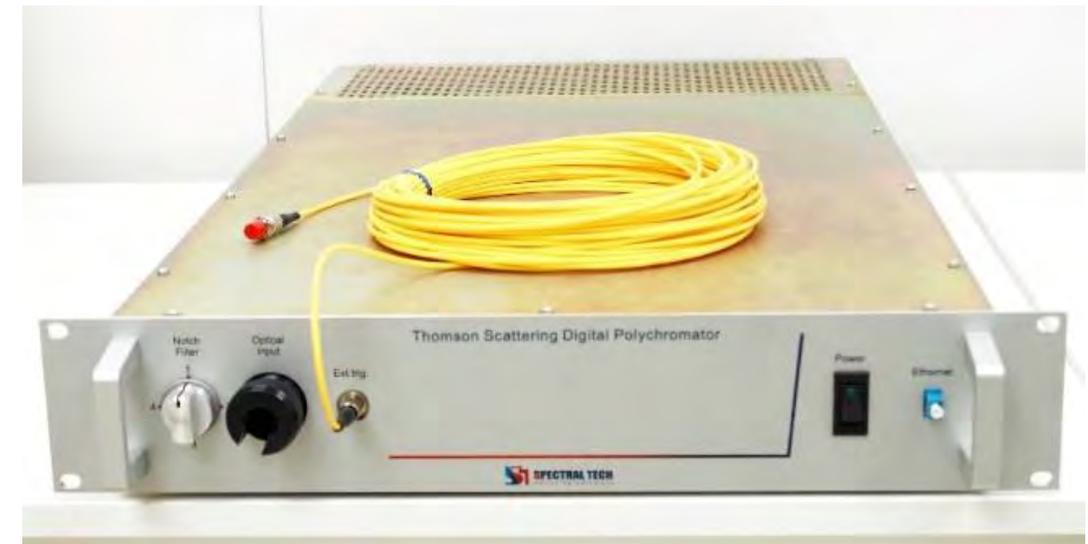
Томсоновское рассеяние света на свободных электронах

- определение локальной n_e по интенсивности сигнала
- определение локальной T_e по уширению линии

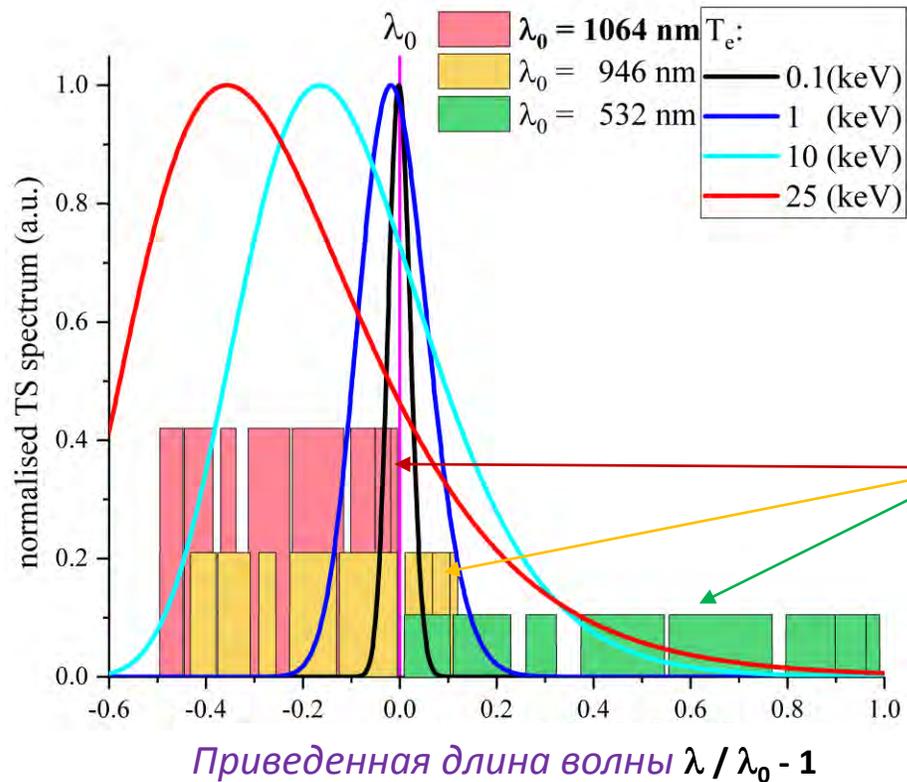
Система регистрации сигналов томсоновского рассеяния + ЛИФ/ЛИТ

Томсоновское рассеяние + ЛИФ

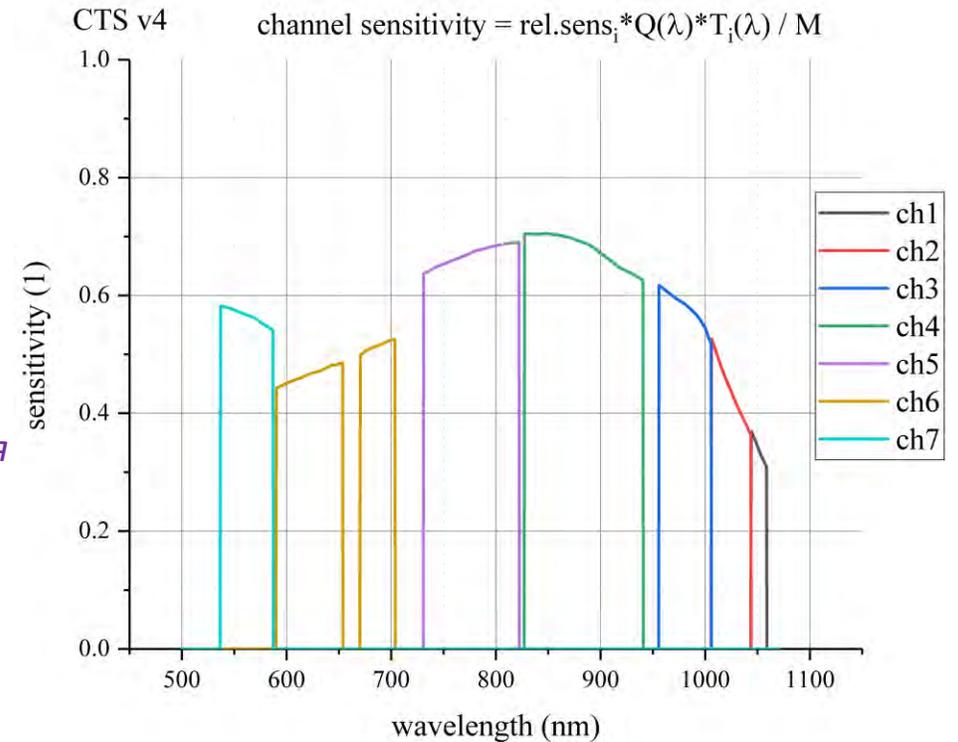
- Up to 7 optical bandpass filters
- Low-power, no cooling required
- Compact mechanical form-factor 19" 2U
- Digitizing 5 GHz, 12 bit
- APD \varnothing 1.5mm ultra-low noise TIAs with rise time \sim 1.4ns
- Optical Gigabit Ethernet
- Built-in signal processing planned to be implemented



МУЛЬТИ-ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ЗОНДИРОВАНИЯ



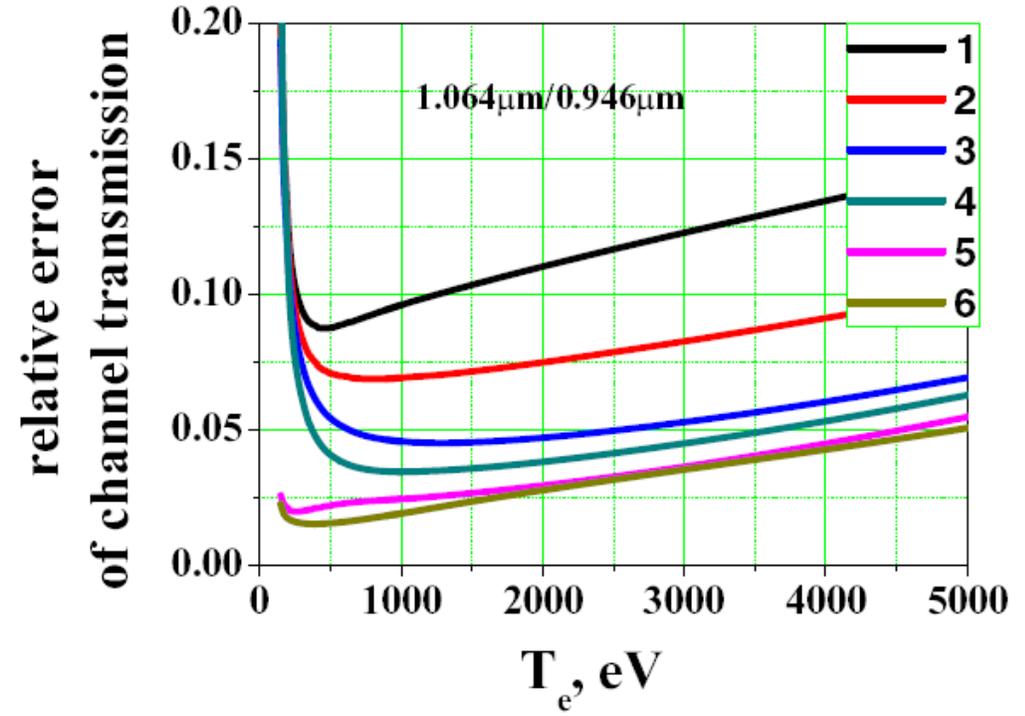
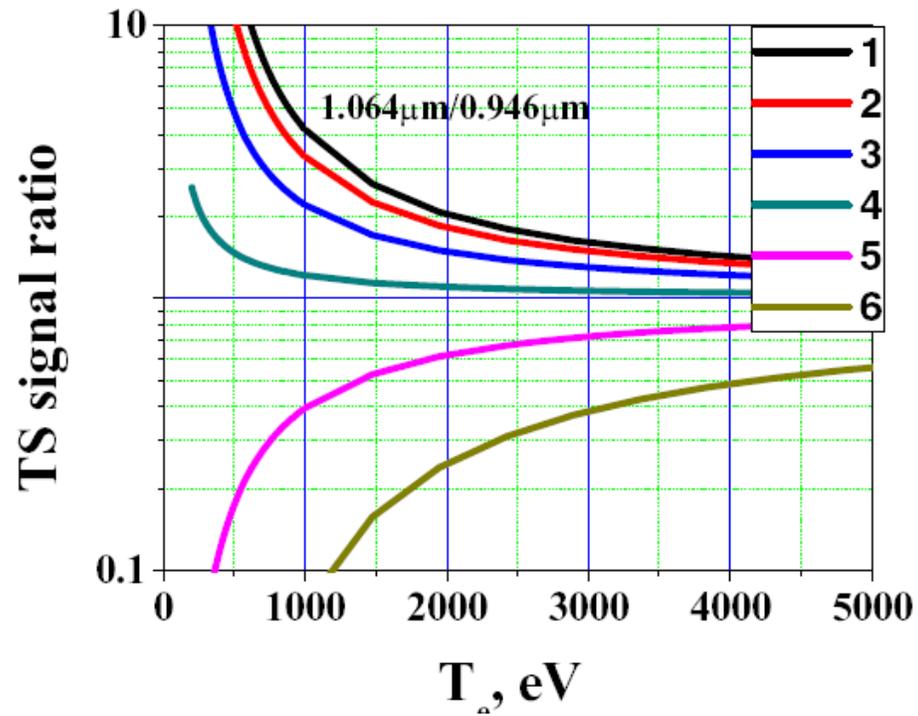
Один и тот же набор спектральных каналов для разных длин волн лазера



Nd:YAG 1064nm + Nd:YAG 532 nm : предусмотрена калибровка системы в узком диапазоне температур
 $T_e = 10 - 20 \text{ keV}$

Nd:YAG 1064nm + Nd:YAG 946 nm : предусмотрена калибровка системы в диапазоне температур
 $T_e = 0,15 - 5 \text{ keV}$

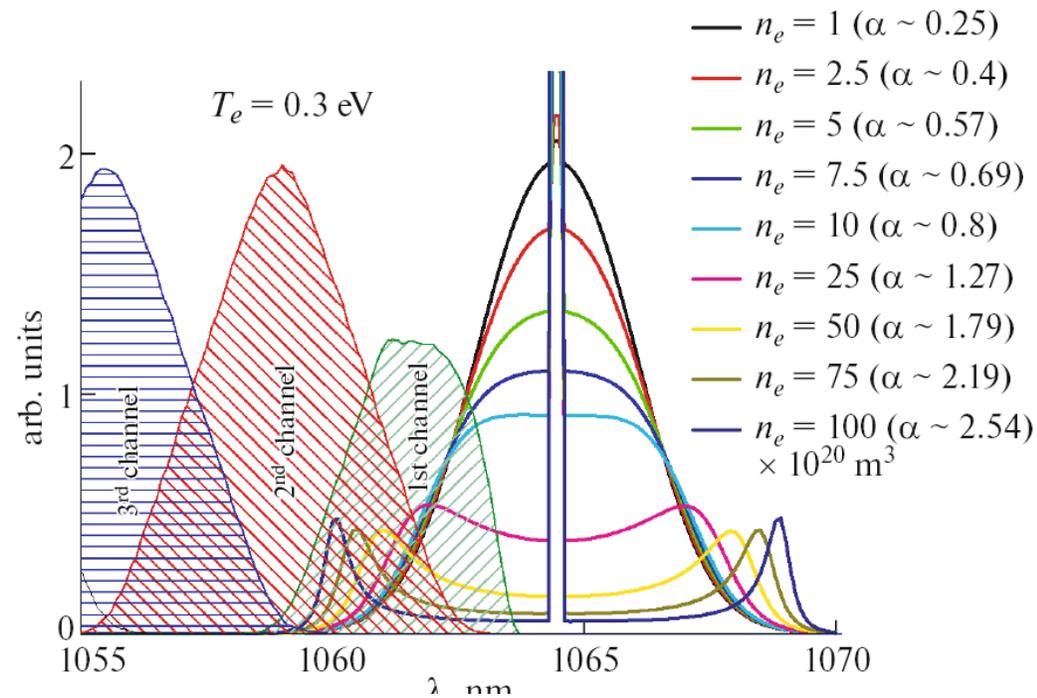
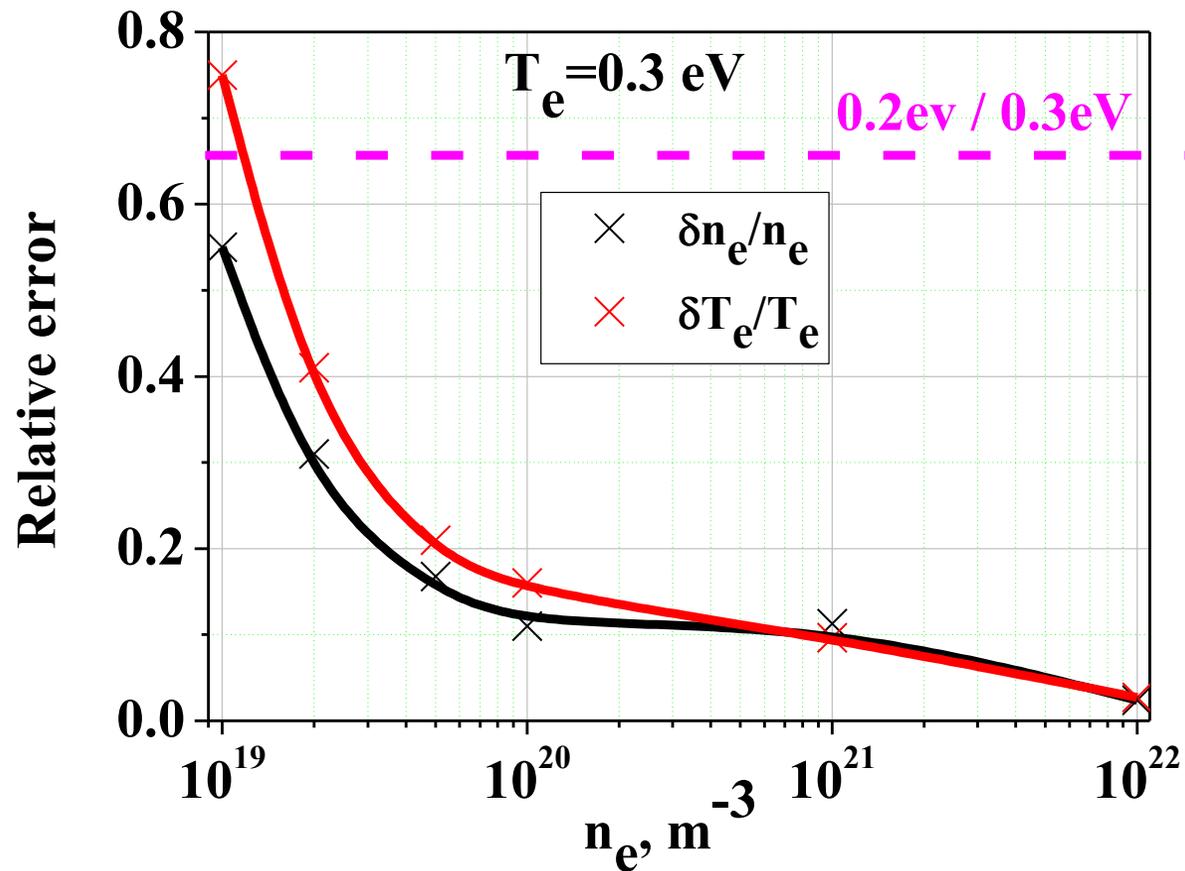
Калибровка относительных чувствительностей каналов при зондировании плазмы на двух длинах волн



ДТР АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ

Численный эксперимент $T_e = 0.3\text{eV}$



Точность измерения T_e в окрестности 1эВ для $n_e > 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$

ЛИФ/ЛИТ в диверторной плазме

ЛИФ/ЛИТ диагностика в диверторе позволит получить:

➤ **Профиль нейтралей, необходимый для:**

-Контроля режима работы дивертора, определения области ионизации/рекомбинации в диверторной плазме.

➤ **Локальные измерения на основе полученных спектральных контуров линий водорода:**

- Соотношение концентраций изотопов водорода.
- Ионная/атомарная температура в диверторе.
- Проекцию скорости движения частиц.

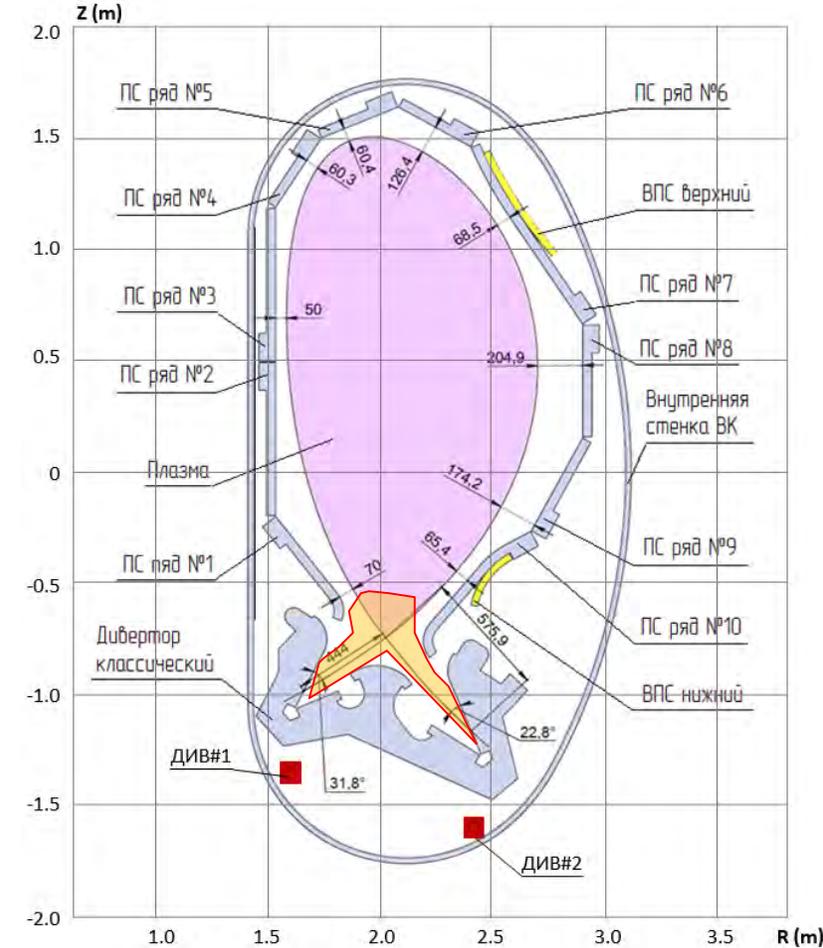
➤ **Концентрацию гелия – продукта синтеза дейтерия и трития**

➤ **Электронную концентрацию для *in-situ* калибровки ДТР**

Для интерпретации измерений ЛИФ и ЛИТ требуется геометрическое совмещение с диагностикой томсоновского рассеяния.

Используется общая оптика / спектральные приборы.

Также как и у ТР

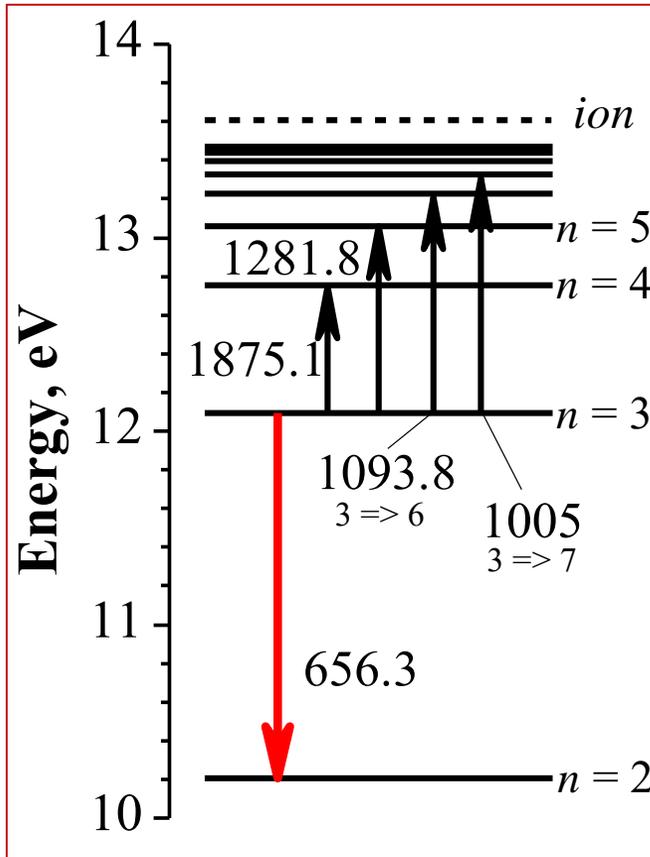


Параметр	Диапазон	Точность
$n_H [m^{-3}]$	$> 10^{16} m^{-3}$	$\delta n_H < 10\%$
$n_H/n_D; n_D/n_T$	0.1-1.0	$\delta R < 20\%$

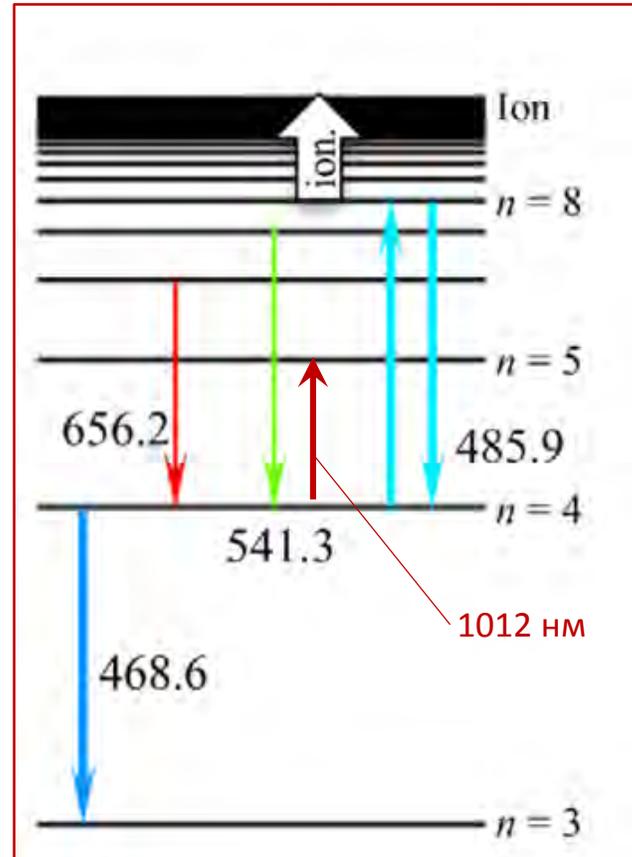
Временное разрешение **10-100мс**
Вдоль силовых линий **<30мм**

Лазерно-индуцированное тушение (ЛИТ, LIQ)

H, D, T



He II



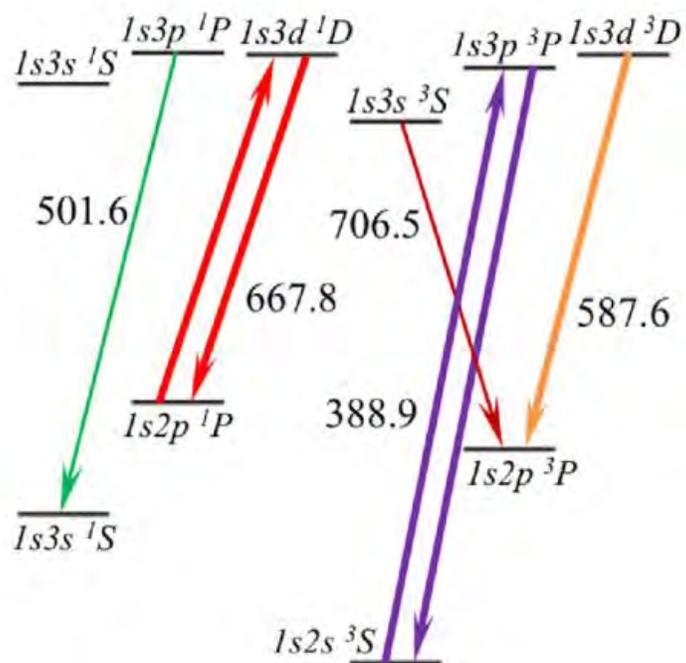
Волоконный лазер

Длина волны (тулиевый) (итербиевый)	(перестраиваемая) 1873-1877нм (для HeI) ~1012нм (для HeII)
Для тулиевого: Спектральная ширина	~ 3 см ⁻¹ (1100 пм на 1875 нм)
Импульсная мощность	<5 Вт
Средняя мощность	<2.5 Вт
Частота повторения	До 2 МГц
Длительность импульса	250 нс



Лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ, LIF)

He I



Параметрические генераторы света

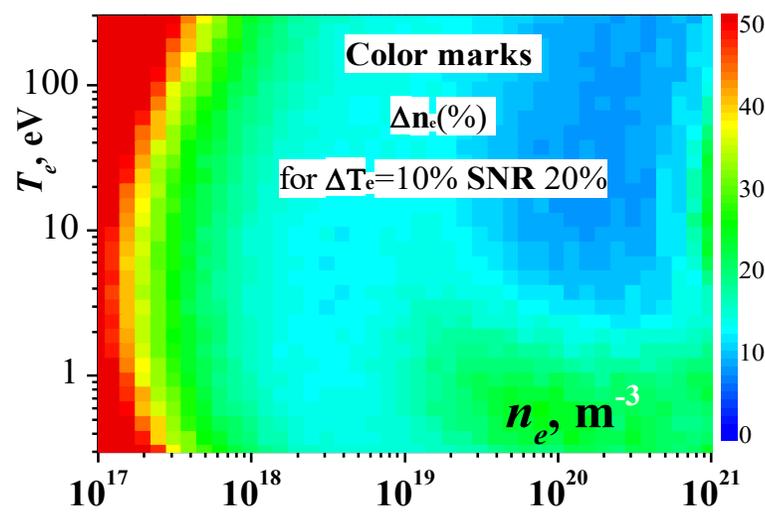
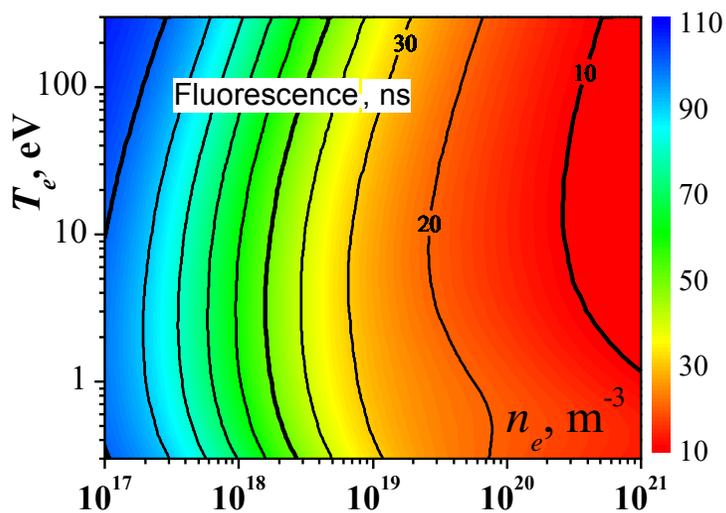
МОДЕЛЬ	LP601	LP603	LP604
Сигнальная волна	410...680	410...710	680...1064
Холостая волна	730...2500	710...2500	1064...2500
Вторая гармоника ¹⁾	—	210...420	340...680
Сигнальная волна	100	90	125
Холостая волна	50	35	75
Вторая гармоника ¹⁾	—	15	25
Расходимость, мрад ³⁾	< 10	< 2	< 2
Ширина линии см ⁻¹ ⁴⁾	10...100	4...6	6...8
Размеры (ДхШхВ), мм:	303 x 206 x 75	343 x 206 x 75	
Требования к лазеру накачки			
Длина волны накачки, нм	355	355	532
Максимальная энергия в импульсе, мДж	350	350	500
Длительность импульса, нс		4...12	
Качество луча		ММ, без горячих точек	
Расходимость, мрад		< 1.5	



Методы калибровки

Длительность сигнала флуоресценции He I для измерения n_e

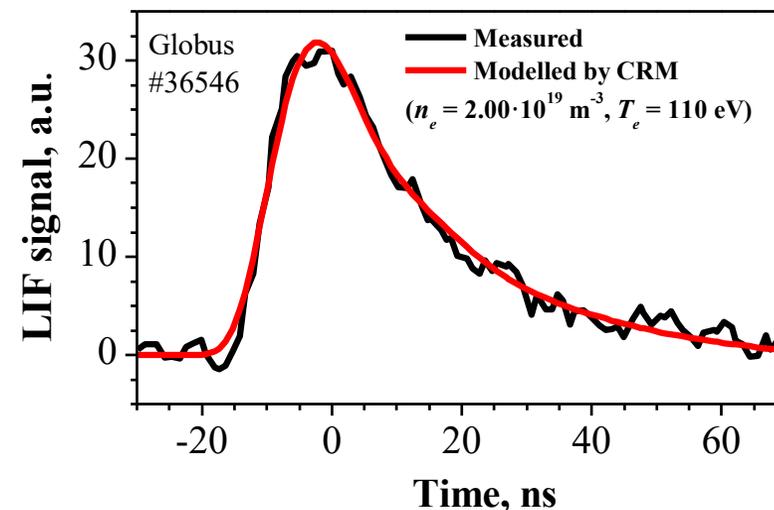
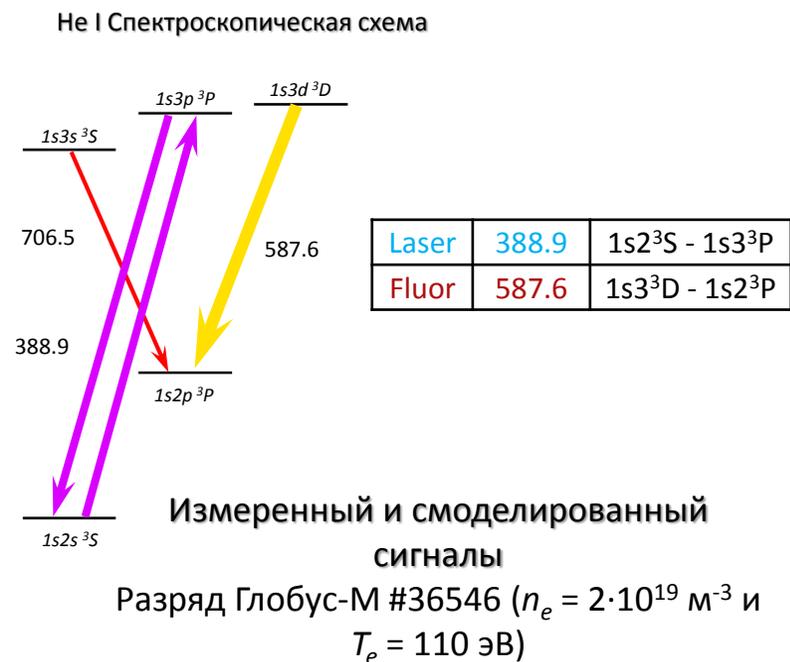
Временная форма сигнала флуоресценции от параметров лазерного излучения используемого для накачки перехода и локальных параметров плазмы (n_e & T_e).



Сравнение данных по измерению концентрации электронов по ТР и ЛИФ дали хорошее совпадение

Лазер:
10 нс / 1 мДж
 $\Delta\lambda_l = 50$ пм $S = 1$ см²

Thomson $T_e \sim 110$ eV
 $n_e = (2.4 \pm 0.2) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
ЛИФ $n_e = (2.0 \pm 0.6) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$



Методы калибровки

Длительность сигнала флуоресценции He I для измерения n_e

Временная форма сигнала флуоресценции от параметров лазерного излучения используемого для накачки перехода и локальных параметров плазмы (n_e & T_e).

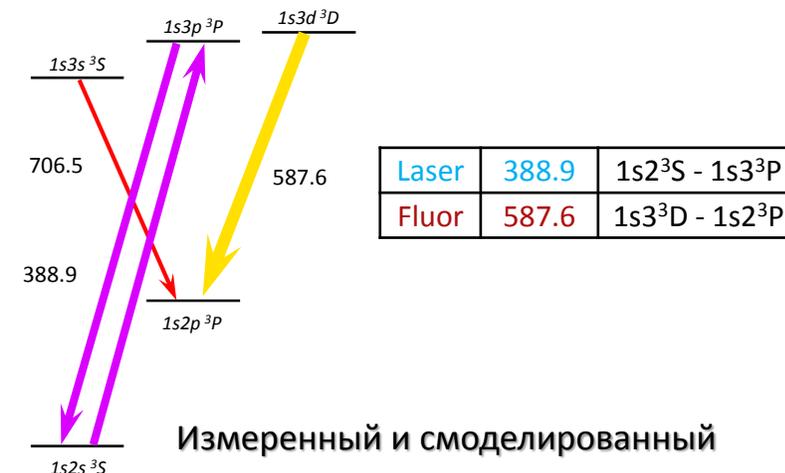
Формула Томсона

$$\sigma_i = 4\pi a_b^2 \frac{Ry^2}{E_0^2} \left(\frac{E_0}{J} - 1 \right)$$

$$\tau_{deex} = \frac{1}{n_e \sigma_i v_{Te}} \sim \frac{1}{2 \cdot 10^{13} \cdot 4 \cdot 10^{-16} \cdot 5 \cdot 10^8} = 250 \text{ нс}$$

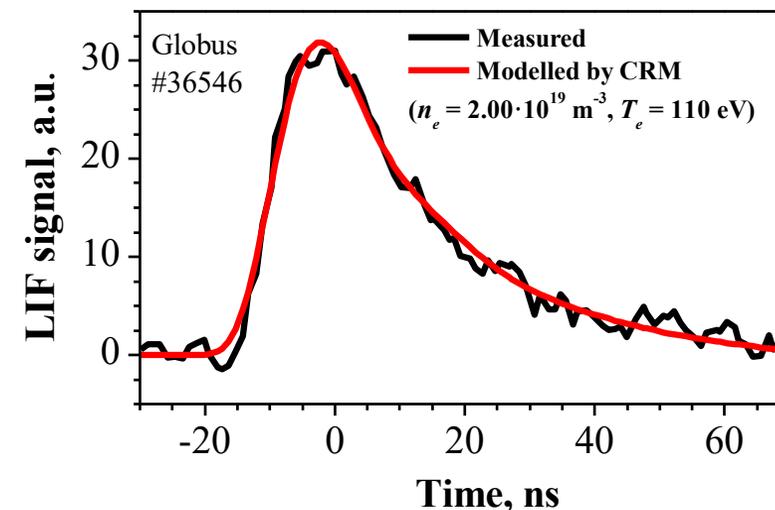
$$\tau_{rad} \approx 30 \text{ нс}$$

He I Спектроскопическая схема



Измеренный и смоделированный сигналы

Разряд Глобус-М #36546 ($n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = 110 \text{ эВ}$)



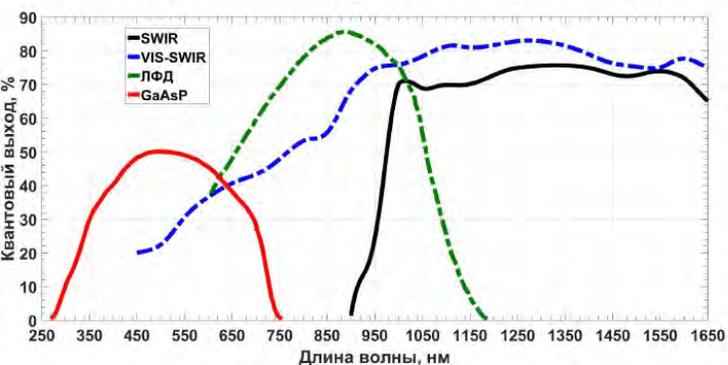
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SWIR КАМЕРЫ В ДИАГНОСТИКЕ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ТОКАМАКЕ T-15MD

^{1,2} Панфилов Д.С., ¹ Асадуллин Г.М., ¹ Бельбас И.С., ¹ Горшков А.В., ¹ Толпегина Ю.И.

¹ НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия, Panfilov_DS@nrcki.ru

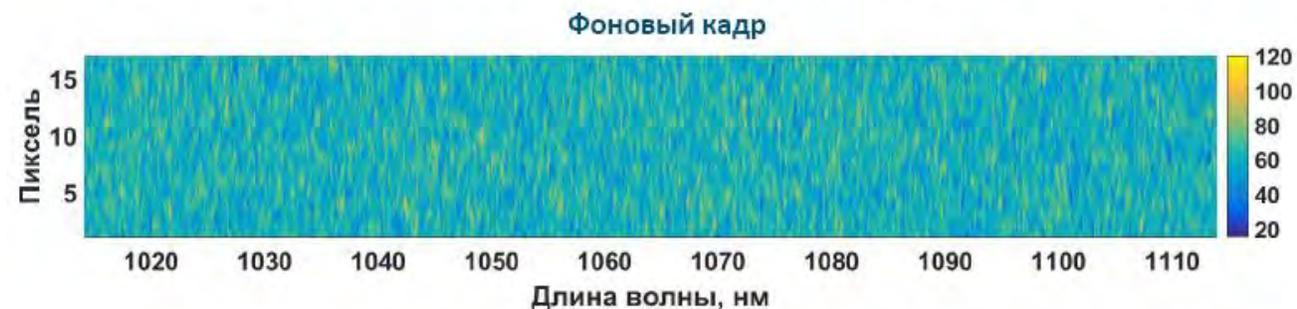
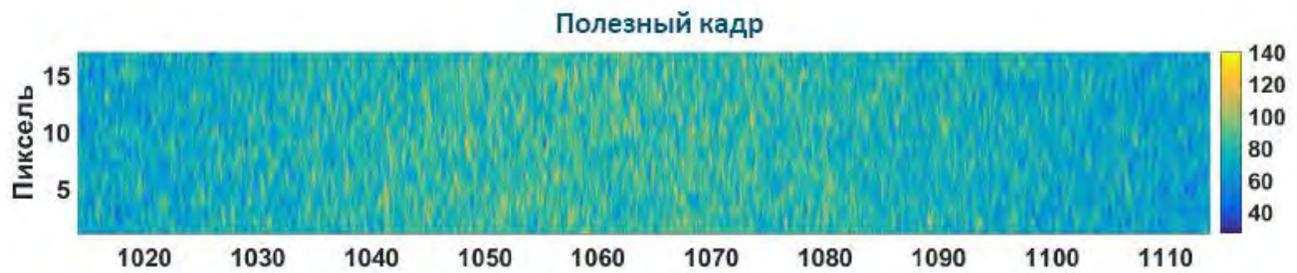
² НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Квантовый выход детекторов, используемых в диагностиках TP



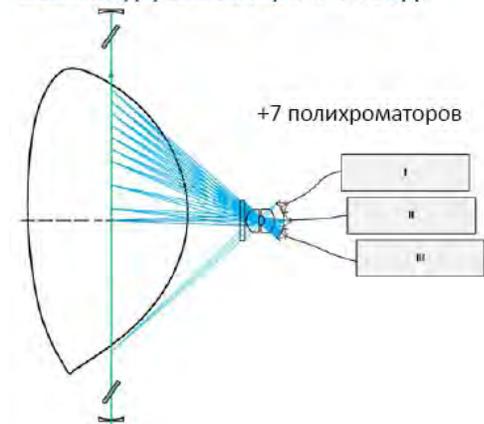
SWIR, VIS-SWIR камеры. ЛФД- лавинный фотодиод,
GaAsP- материал фотокатода ЭОПа

	Owl 640 N	Zephr1.7s	C-RED 2
Тип	VIS-SWIR	SWIR	SWIR
Размер пикселя	15 мкм	15 мкм	15 мкм
Частота кадров	120 Гц	250 Гц	600 Гц
АЦП	14 бит	14 бит	16 бит
Экспозиция от	1 мкс	1 мкс	20 мкс
Размер матрицы	640x512		
	9.6x7.68 мм		
Шум камеры	18 e ⁻	30 e ⁻	30 e ⁻



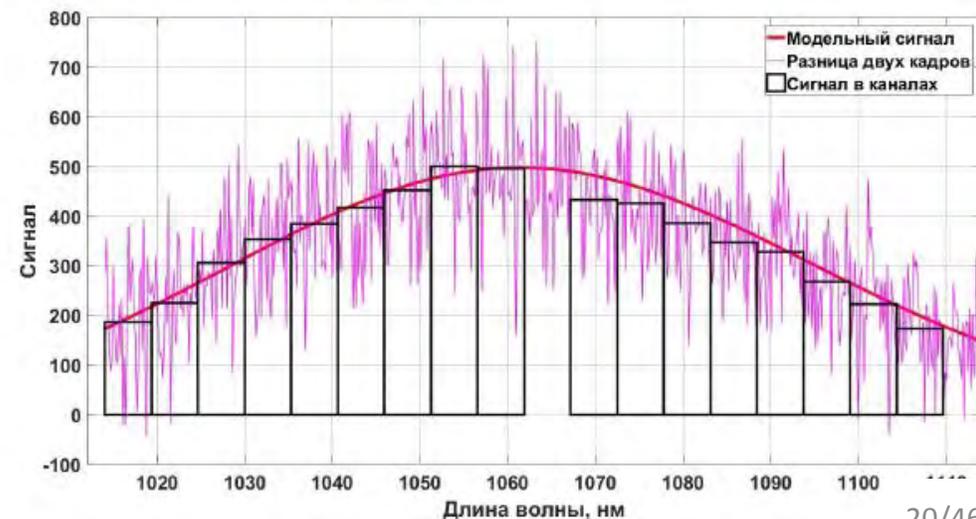
Используется 7-ми проходная система зондирования плазмы.

Схема зондирования верт. TP T-15MD



	TV TS T-15MD	SWIR TS T-15MD
L-dΩ	5.4·10 ⁻⁵ ср·м	1·10 ⁻⁴ ср·м
Оптоволокно	2x1 мм	2.2x1.1 мм
Число каналов	159	152
Количество полихроматоров	3	10
Δλ	410-690 нм	930-1200 нм
Разрешение	13.84 мм	14.47 мм
Пропускание	25%	25%
Тип детектора	sCMOS	VIS-SWIR
Шум	3 e ⁻	20 e ⁻
Частота кадров	50-100 Гц	120 Гц

$n_e = 10^{20} \text{ м}^{-3}$
 $T_e = 250 \text{ эВ}$
 $\vartheta = 90^\circ$
 Шум $10e^-$
 $L \cdot d\Omega = 1 \cdot 10^{-4} \text{ ср} \cdot \text{м}$
 $\Delta\lambda = 100 \text{ нм}$
 $t_{\text{эксп}} = 1 \text{ мкс}$



Корпускулярные диагностики

XX Всероссийская конференция
ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
г. Сочи, 18 - 22 сентября 2023 г.

КОМПАКТНЫЙ МОНИТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ
ПЛАЗМЫ

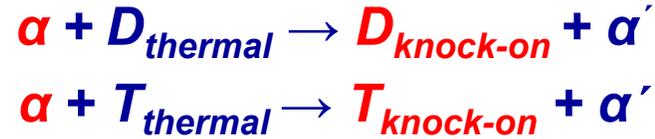
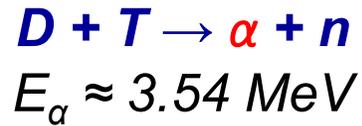
**В.И. Афанасьев, С.С. Козловский¹, А.Д. Мельник,
М.И. Миронов, А.С. Наволоцкий, В.Г. Несеневич, М.П. Петров,
С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев**

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ИОНОВ ОТДАЧИ

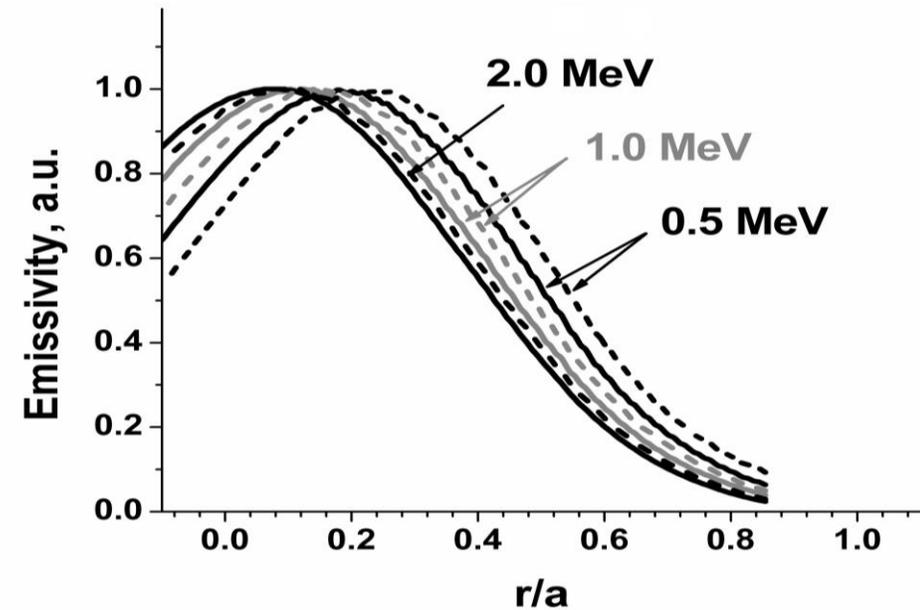
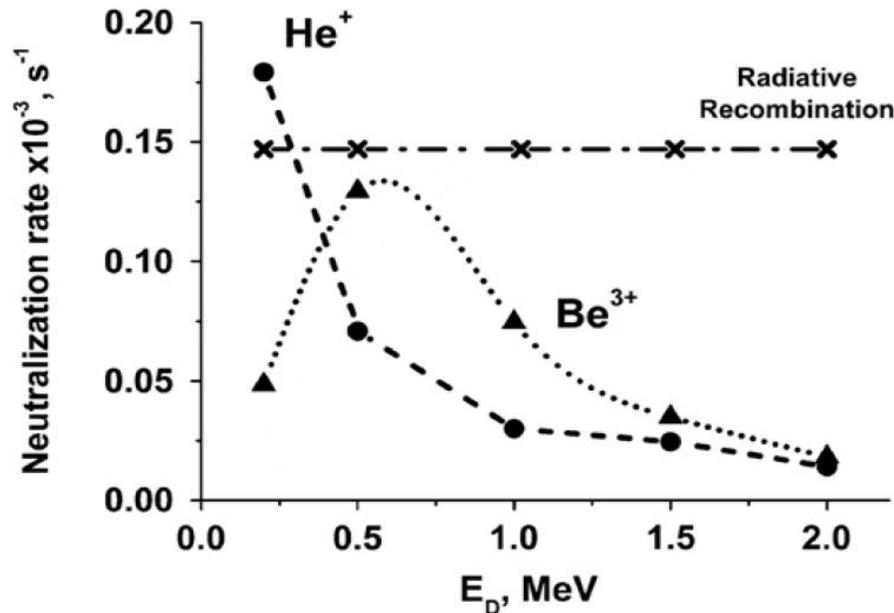
Упругие столкновения тепловых ионов D, T с термоядерными α -частицами:



Ryutov D. *Phys. Scr.* – 1992. – 45 – 153.

Главный механизм нейтрализации ионов в МэВ-диапазоне энергий – радиационная рекомбинация:

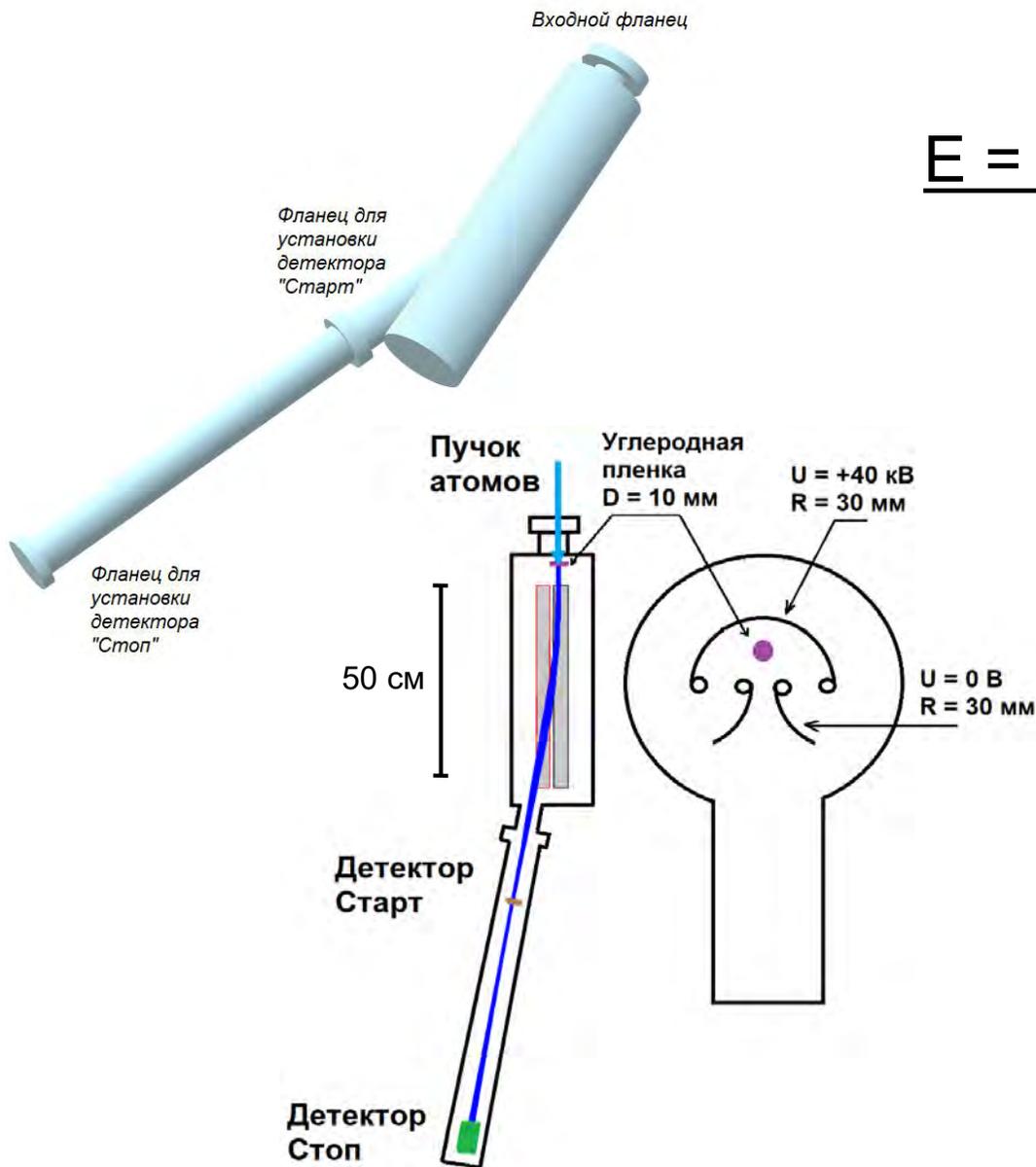
Быстрые атомы отдачи испускаются в основном из центральной области плазмы:



Afanasyev V. I. et al. *Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A* 621 – 2010. – 456.

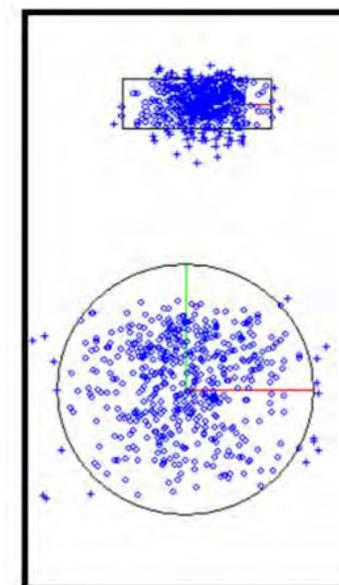
Afanasyev V. I. et al. *Plasma Phys. Control. Fusion* 55. – 2013. – 045008.

КОМПАКТНЫЙ МОНИТОР: СХЕМА ПРИБОРА



$$E = 1 \text{ МэВ}$$

Трехэлектродная квазицилиндрическая диспергирующая система обеспечивает фокусировку пучка ионов и эффективность сбора частиц $\approx 90\%$:



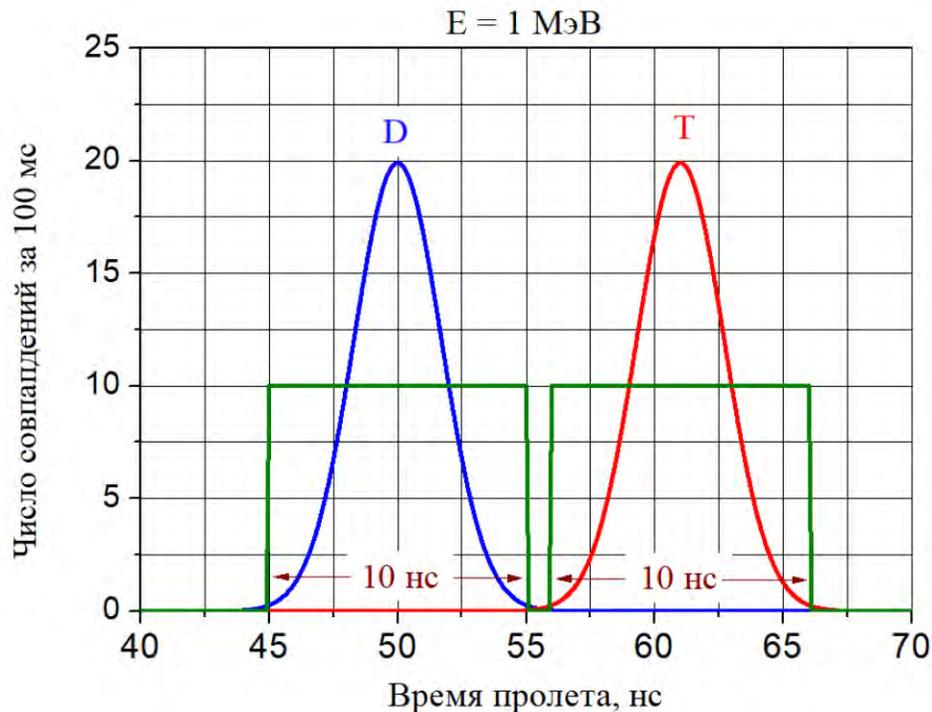
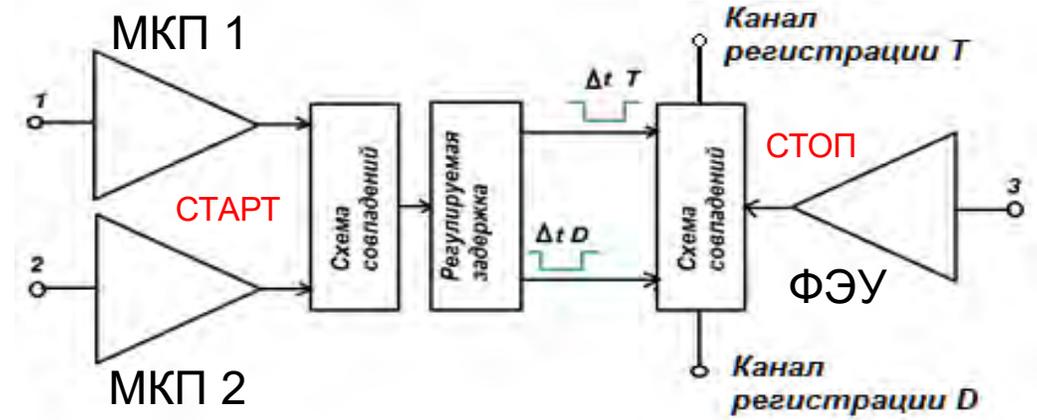
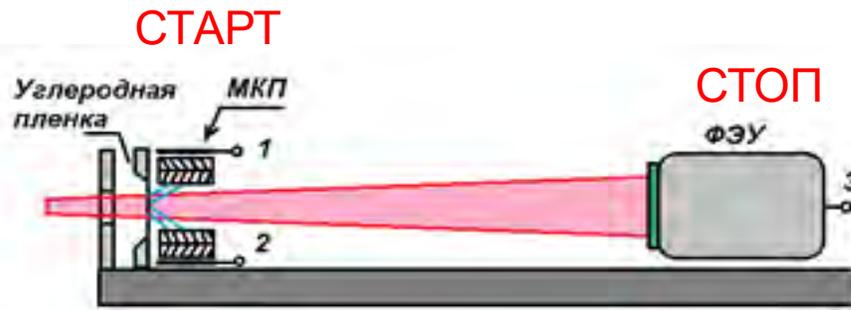
Старт
(входная диафрагма 10×4 мм)

Детектор Стоп (ø20 мм)

Энергетическое разрешение определяется размерами входной диафрагмы и составляет 24 кэВ (2.4%)

КОМПАКТНЫЙ МОНИТОР: ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ АНАЛИЗ

Устройство времяпролетного канала:



Длина канала, см	Время пролета канала, нс	
	D ⁺	T ⁺
49	50	61

Кривые совпадений для ионов дейтерия и трития полностью укладываются в соответствующие временные интервалы (10 нс) без перекрытия, что обеспечивает эффективное разделение частиц по массам

Интерферометрия



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



ООО «Лазер Ай»

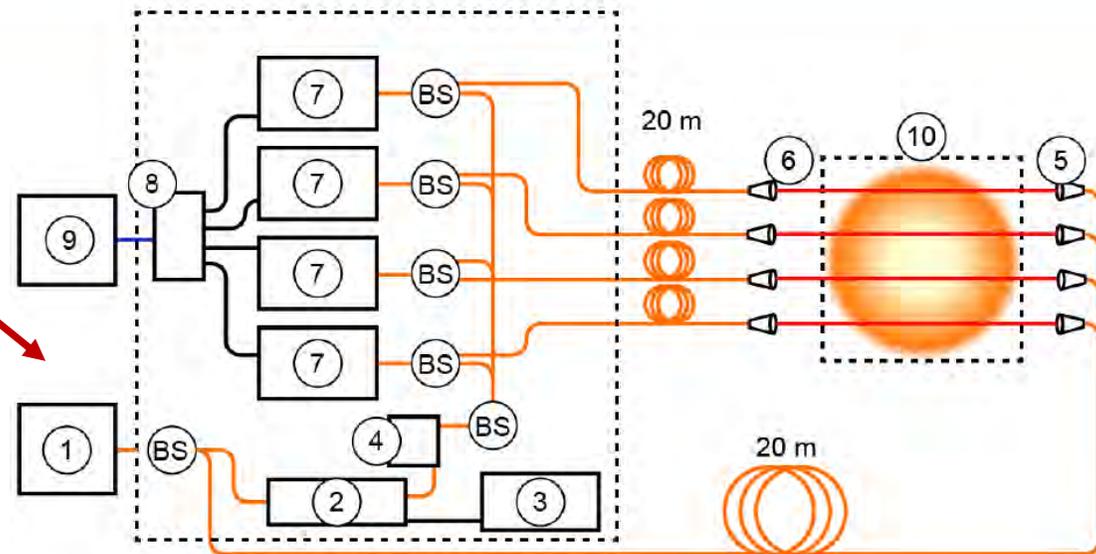
ЛАЗЕРНАЯ ГЕТЕРОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

Губский К.Л., Белов А.С., Колесников Н.М., Кузнецов А.П., Лукьянов К.С.

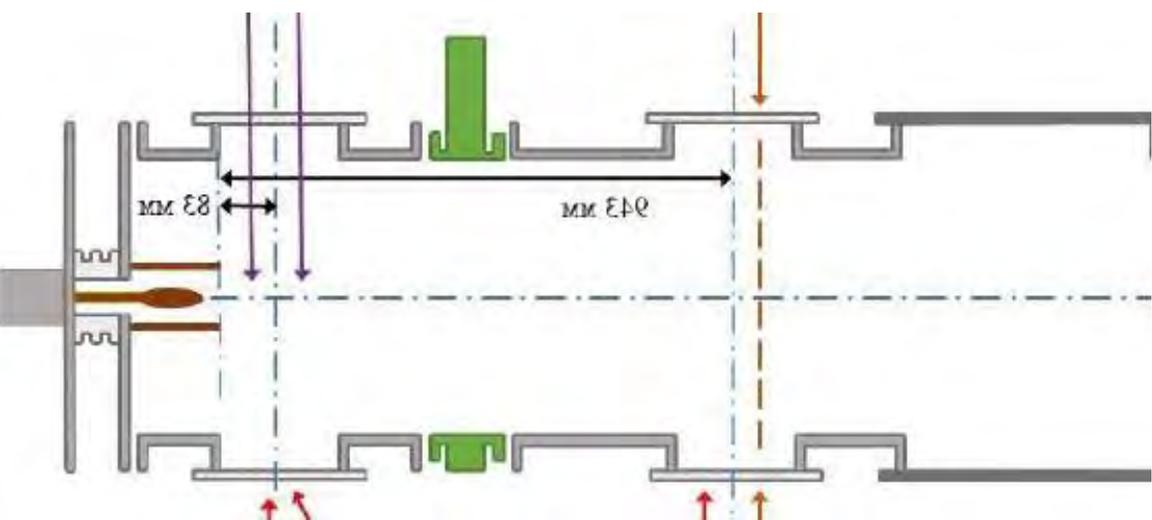
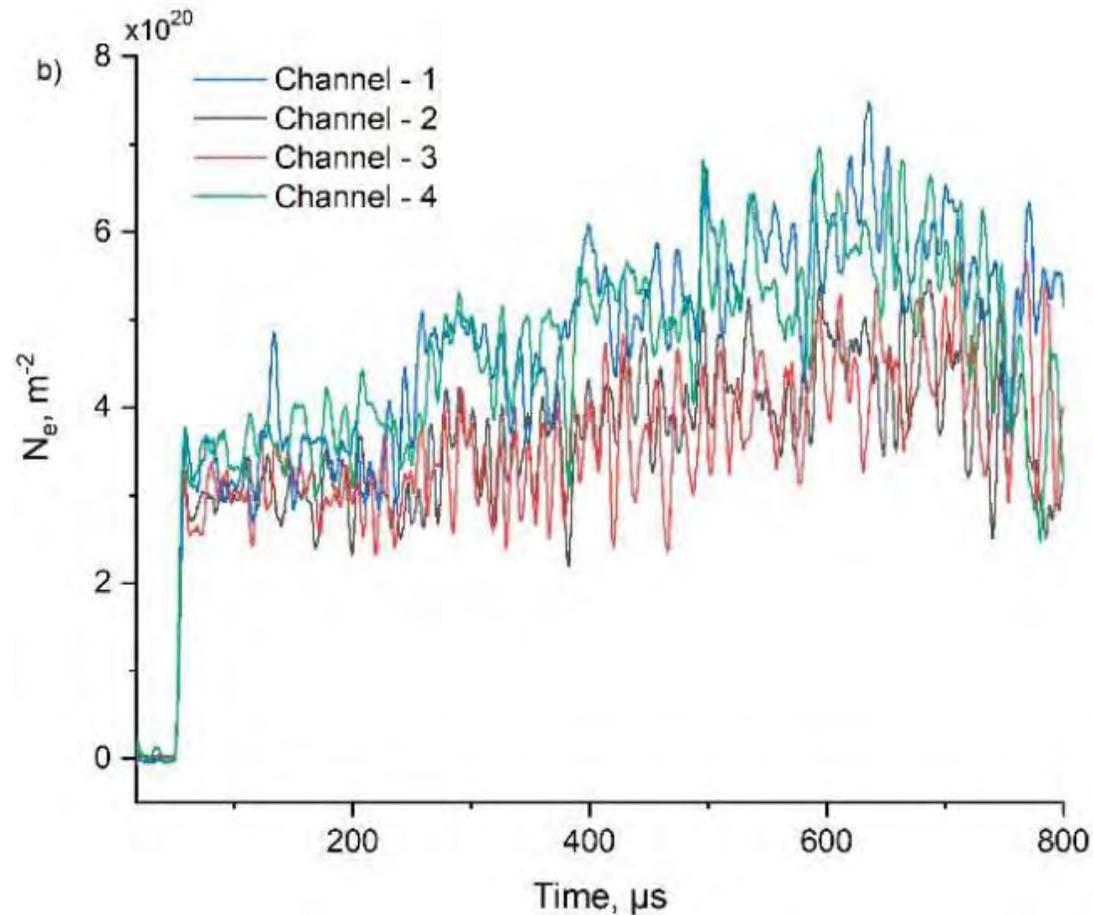


Длина волны, мкм	Фазовый сдвиг, радиан	
	При дине хорды 45 см, и плотности плазмы 10^{19} м^{-3}	
0,532	(Nd:YAG)	0.006
1,064	(Nd:YAG)	0.01
1,55	(Er)	0.02
5,3	(CO)	0.06
10,6	(CO ₂)	0.12
118,8	(CH ₃ OH)	1.3

СХЕМА МНОГОКАНАЛЬНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА



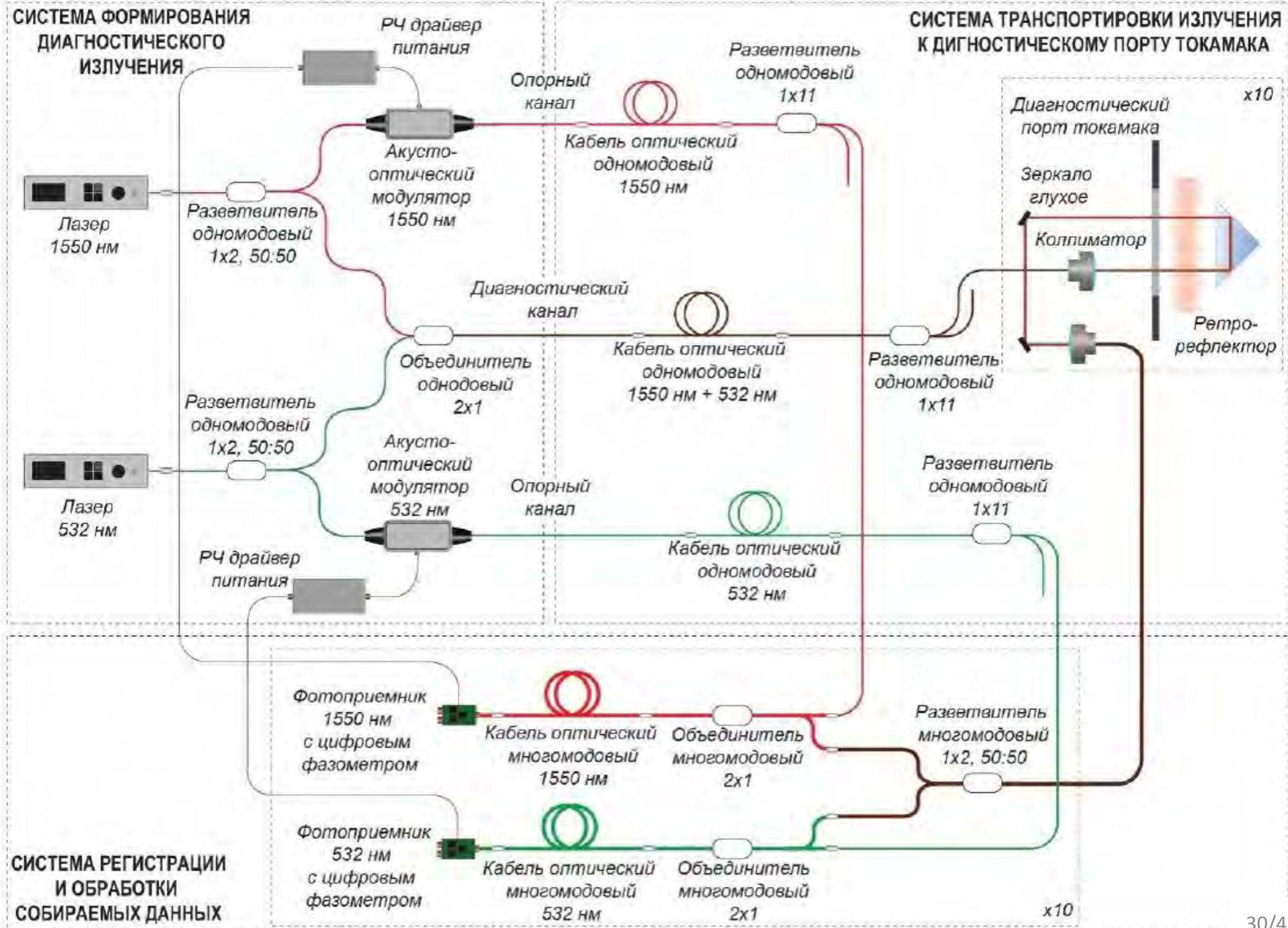
1 — волоконный лазер с диодной накачкой, 2 — акустооптический модулятор, 3 — генератор сигналов $f=40 \text{ MHz}$, 4 — модуль с аттенюатором и измерителем мощности, 5 — коллиматоры Thorlabs CFC11P-C, 6 — коллиматоры Thorlabs F220APC-1550, 7 — плата оптоэлектронного преобразователя с малошумящим полосовым усилителем промежуточной частоты, 8 — Ethernet-модуль, 9 — ПК, 10 — вакуумная камера.



Электронная плотность	$10^{16}-10^{23}m^{-3}$
Длительность горения плазмы	1 мс
Диаметр сечения плазменного потока	6-10 см
Давление внутри вакуумной камеры	10^{-4} мм рт. ст.

T-15MD

Интерферометр 2
Волоконный
Er+Nd
1,55 мкм + 0,532 мкм



Спектроскопия

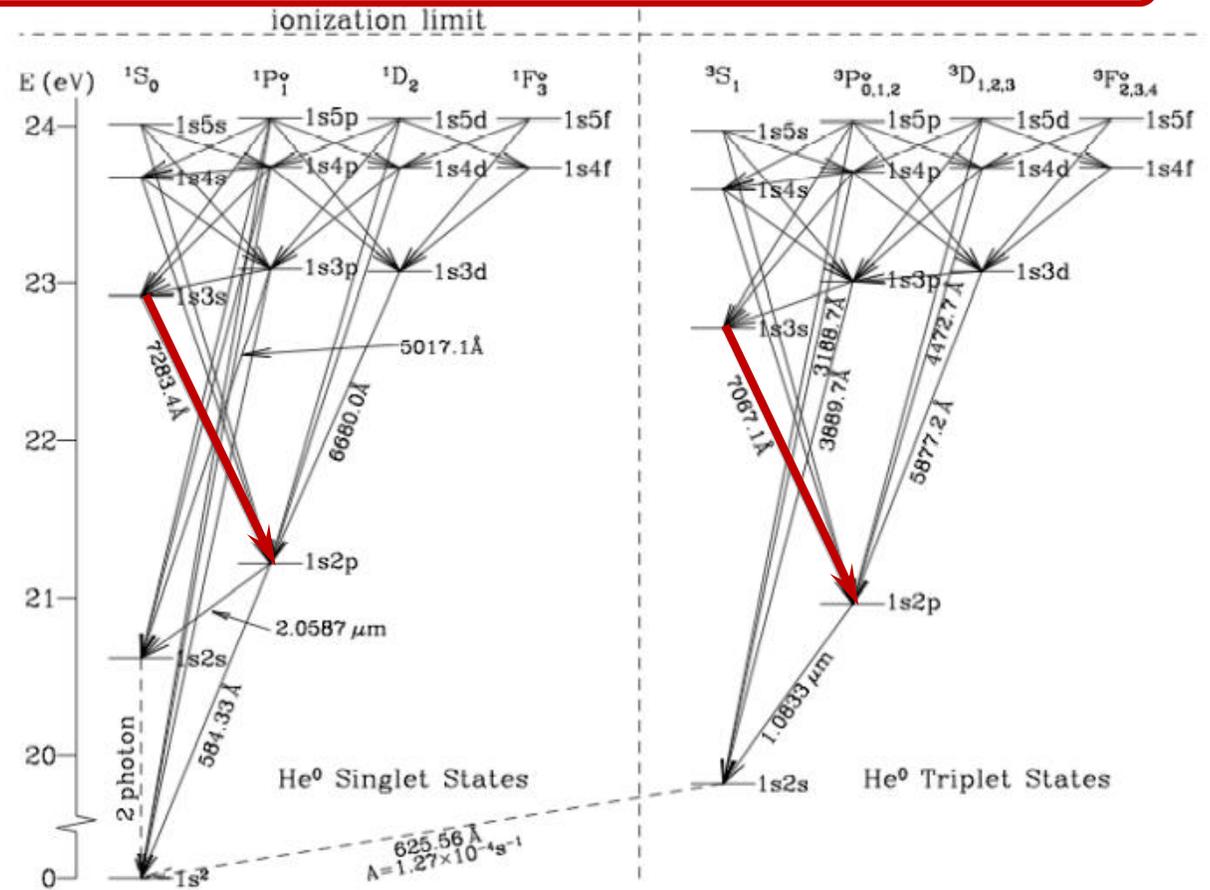
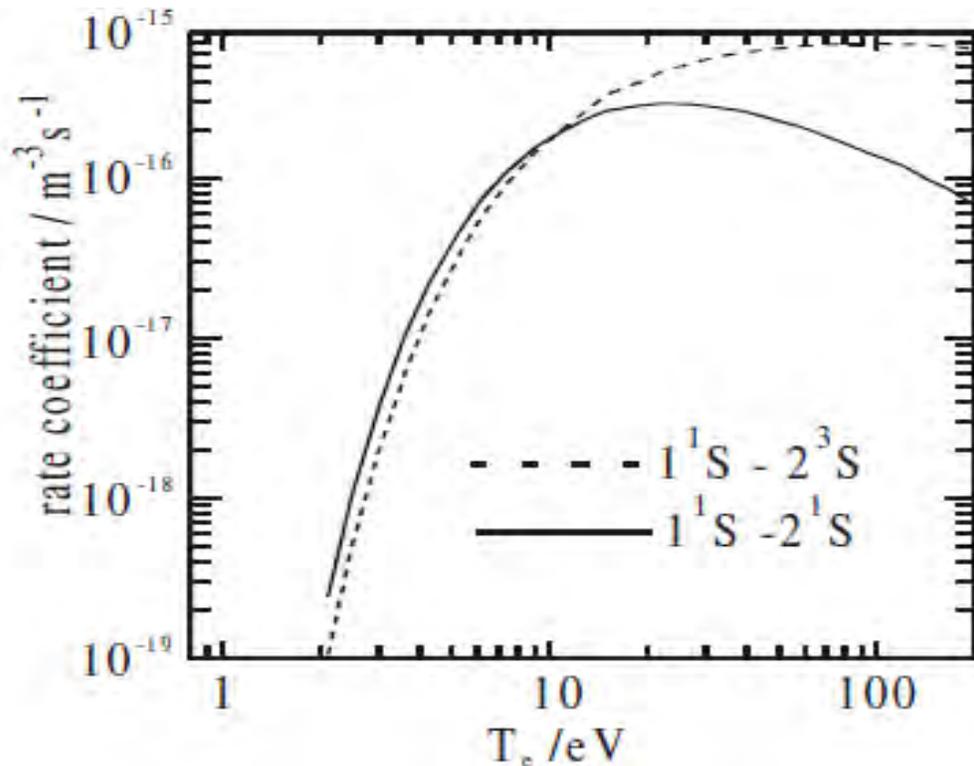
Модель расчета излучения
нейтрального гелия для
спектроскопической диагностики
периферийной плазмы токамака
«Глобус-М2»

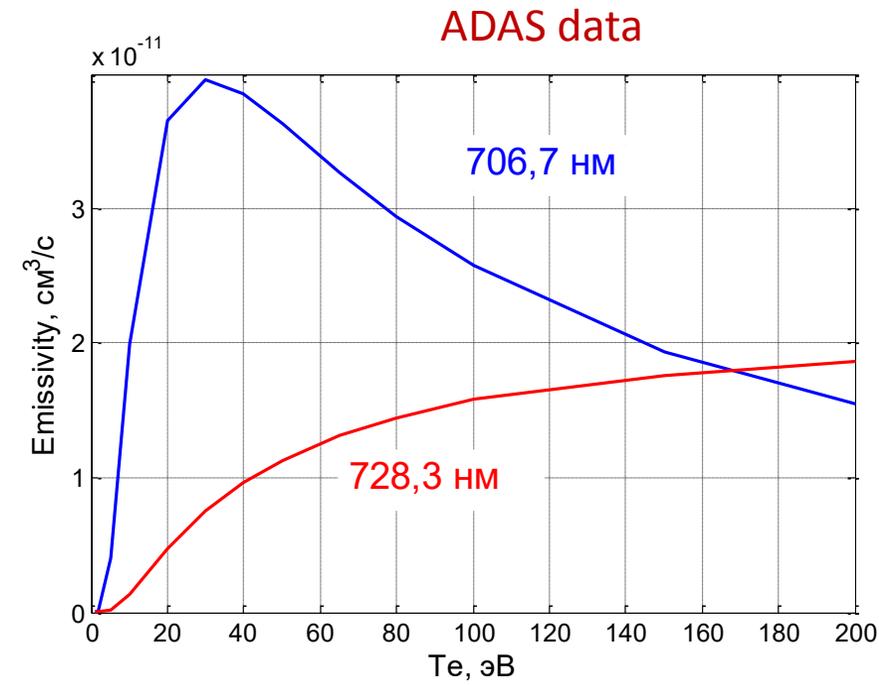
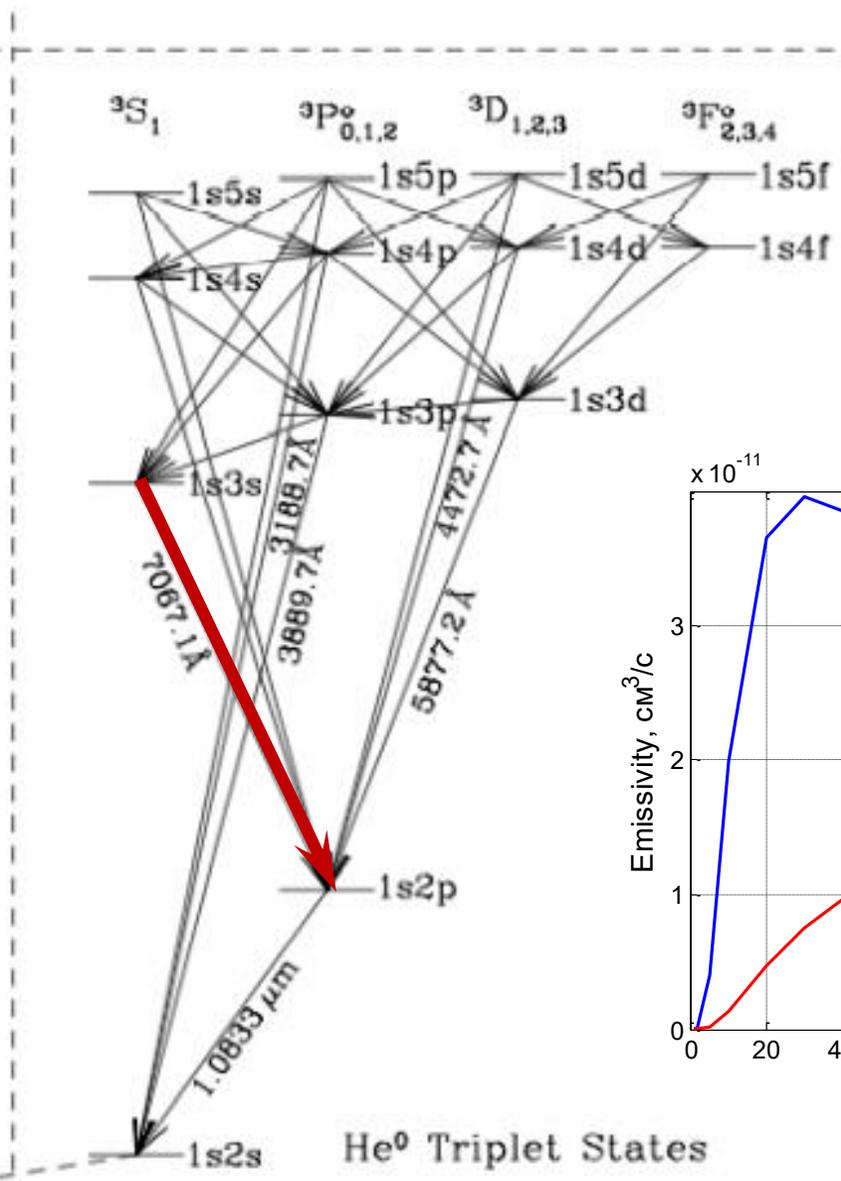
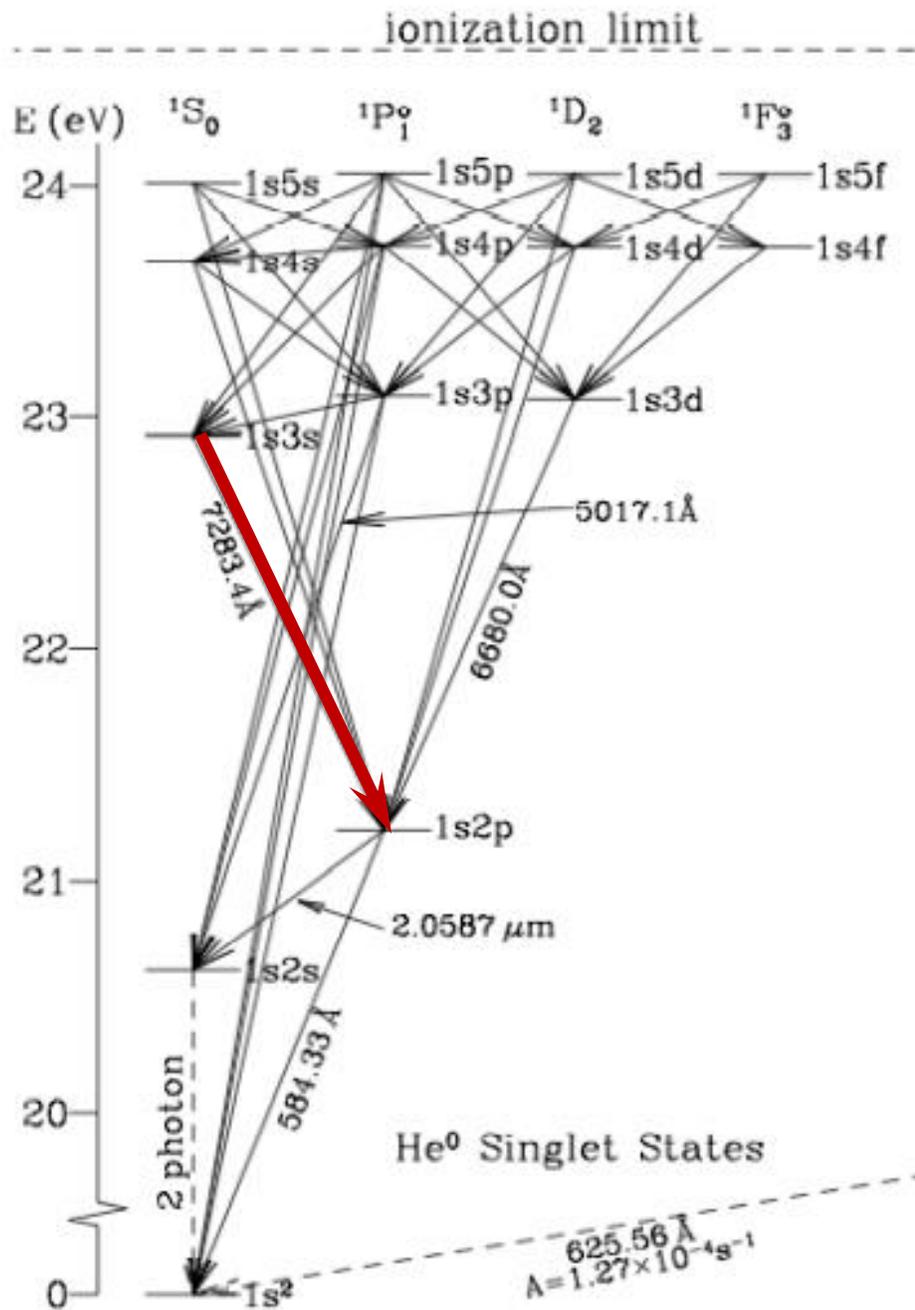
Тимохин В. М., Ануфриев Е.А., Коробко Д. Д.,
Сергеев В. Ю., Шаров И.А.

Санкт-Петербургский Политехнический университет им. Петра
Великого

Измерение температуры по соотношению линий He I

- Интенсивности линий нейтрального гелия для синглетных и триплетных переходов имеют различный температурный/плотностной характер зависимости;
- Существует принципиальное ограничение снизу для измерений $T_e \leq 10$ эВ, $n_e \leq 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$;
- Реализация метода требует расчетов по столкновительно-излучательной модели (СИМ).



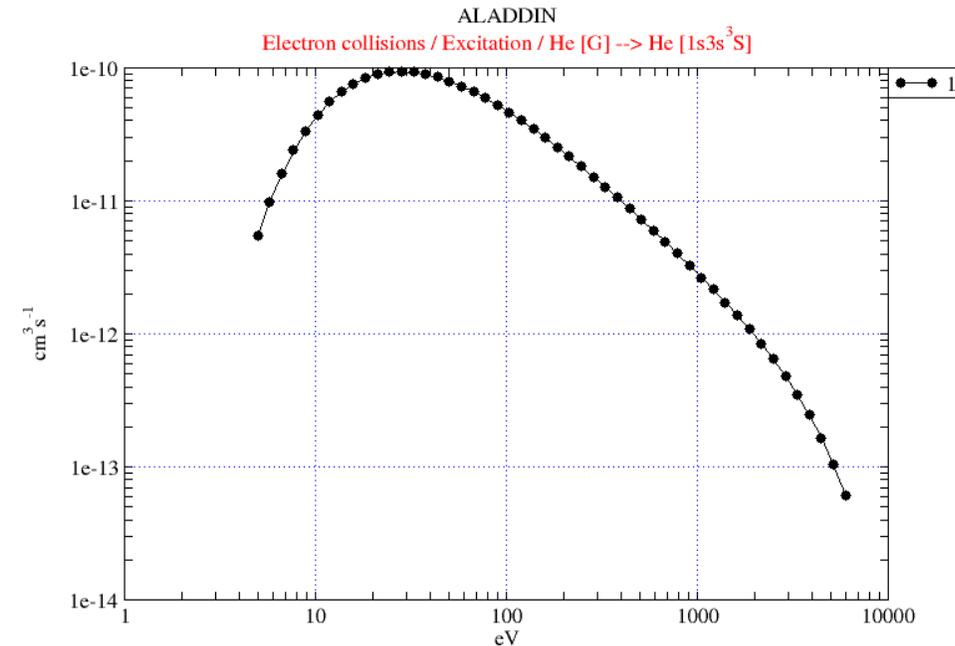


Оценка населенности возбужденных состояний

$$\frac{dn_{He}}{dl} = -n_e \left(\sigma_{ch} + \sigma_i + \frac{\langle \sigma_e v_e \rangle}{v_b} \right) n_{He} \quad (*)$$

$$n_{line} = n_e n_{He} \langle \sigma_{exc} v_e \rangle$$

- Скорость реакции возбуждения на верхний уровень 706 нм.



Tue Sep 19 19:54:36 2023

Made with Grace 5.1.18

[*] J. Wesson, Tokamaks, fourth ed., Oxford University Press, 2011.

Discharge 40269, Time (ms) = 171

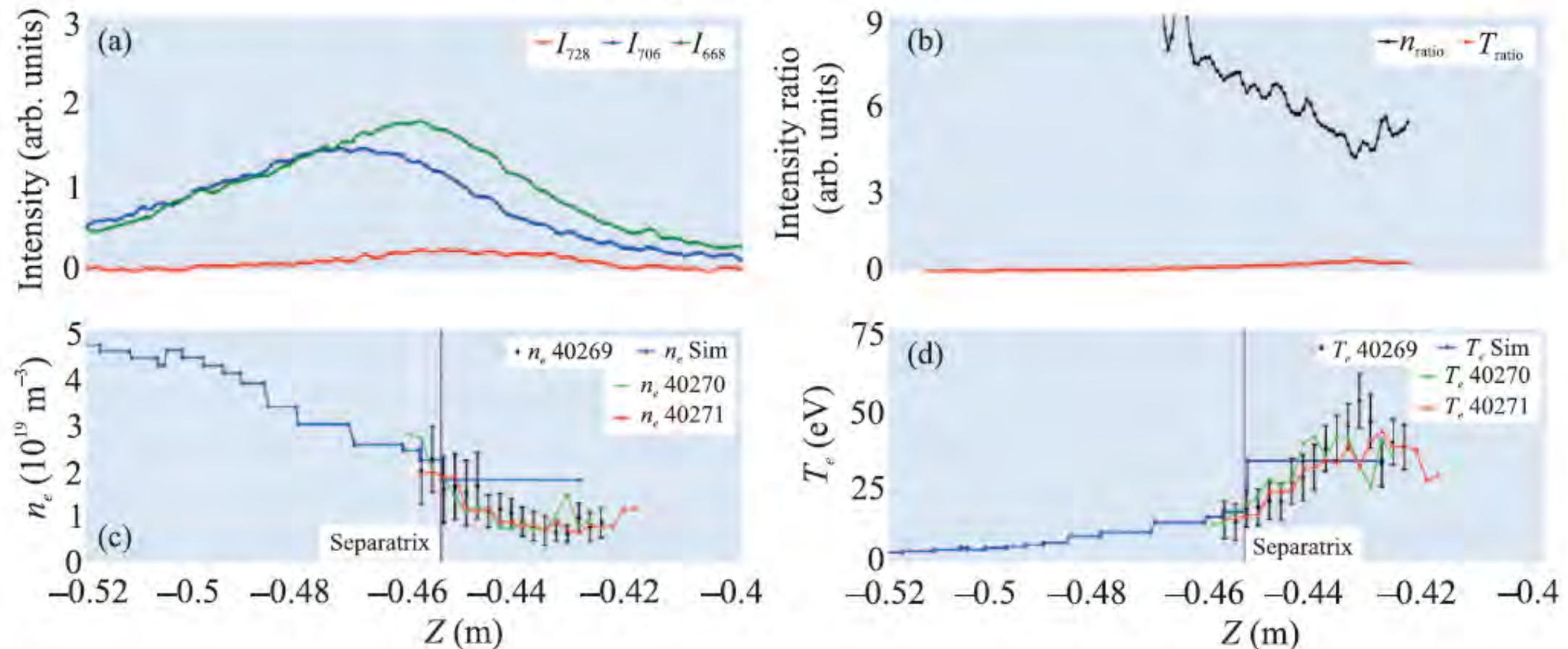


Рис. 5. (Цветной онлайн) Результаты обработки снимка полихроматора (рис. 3) в разряде 40269 на 171 мс, представленные вдоль оси капилляра системы газонапуска Z; (a) – Распределение интенсивности линий в каналах полихроматора. (b) – Распределение отношений интенсивностей линий (синглет-триплетному переходу соответствует красная линия, синглет-синглетному – черная). (c) – Профиль электронной плотности и (d) – профиль электронной температуры (черные точки с планками погрешностей) в сравнении с параметрами, рассчитанными по коду SOLPS-ITER (синие линии), и в сравнении с другими разрядами серии (зеленые и красные линии для разрядов 40270 и 40271 соответственно). Расчетное положение сепаратрисы на нижних графиках обозначено вертикальной фиолетовой линией

Плазменные установки

Концепция диагностической системы стенда ПЕРСТ для отработки БПРД

Бобырь Н.П.¹, Казиев А.В.^{2,3}, Тумаркин А.В.^{2,3}, Колодко Д.В.^{2,3},
Брагин Е.Ю.¹, Бунин Е.А.¹, Сухов А.Е.¹, Кутузов Д.С.¹,
Шуровский Д.О.¹, Жильцов В.А.¹, Спицын А.В.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт»

²НИЯУ МИФИ

³ООО ПИНЧ

Безэлектродный плазменный ракетный двигатель БПРД

Комплексная программа Российской Федерации
"Развитие техники, технологий и научных исследований
в области использования атомной энергии в Российской
Федерации на период до 2024 года"

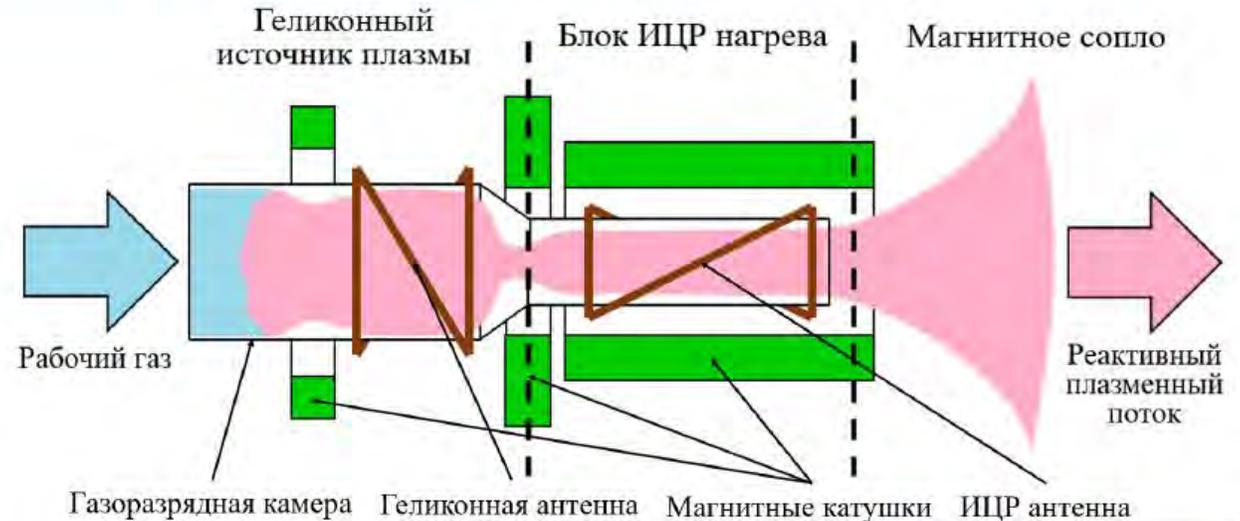


Федеральный проект №3
«Разработка технологий управляемого
термоядерного синтеза и инновационных
плазменных технологий»



1. НИОКР в обеспечение создания безэлектродных плазменных ракетных двигателей (БПРД)
2. Техническое перевооружение экспериментально-стендовой базы плазменных технологий для создания комплекса испытаний макетов для отработки элементов и оптимизации параметров лабораторных образцов безэлектродных плазменных ракетных двигателей (БПРД)

стенд «ПЕРСТ»



Тяга
3 Н

Уд. импульс
5000 с

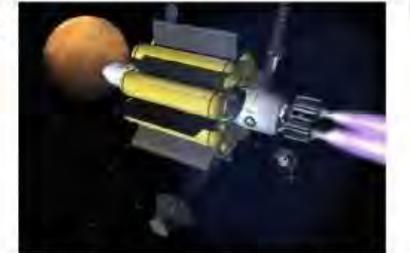
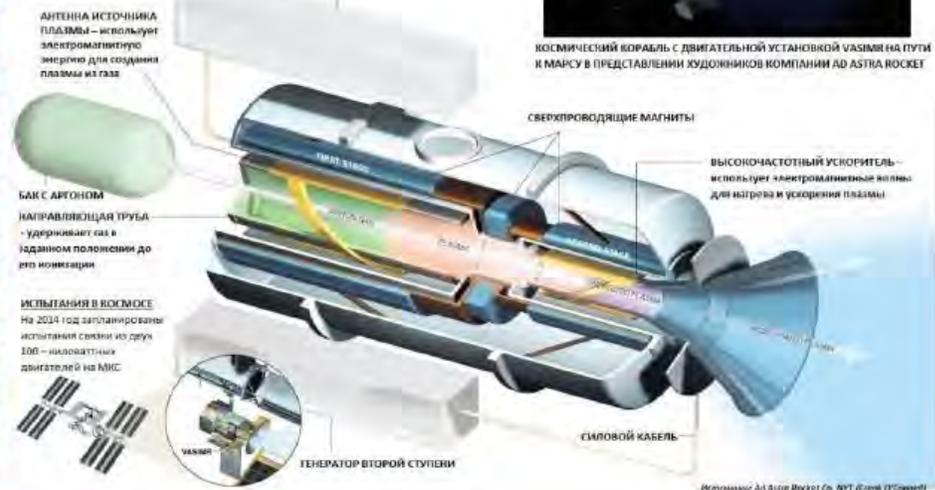
Расход
0,1 г/с

Мощность
> 100 кВт

VASIMR [AD ASTRA ROCKET]

Большая Научная Библиотека
www.sci-lib.com

ГЕНЕРАТОР ПЕРВОЙ СТУПЕНИ – обеспечивает электроснабжение двигателя во время испытаний. В летном режиме питание может осуществляться либо большой массивной солнечной батареей, либо небольшой ядерной энергоустановкой



КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ С ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ VASIMR НА ПУТИ К МАРСУ В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ХУДОЖНИКОВ КОМПАНИИ AD ASTRA ROCKET

Стенды: ПС-1, ПН-3, Е-1

Мощности: 1-50 кВт

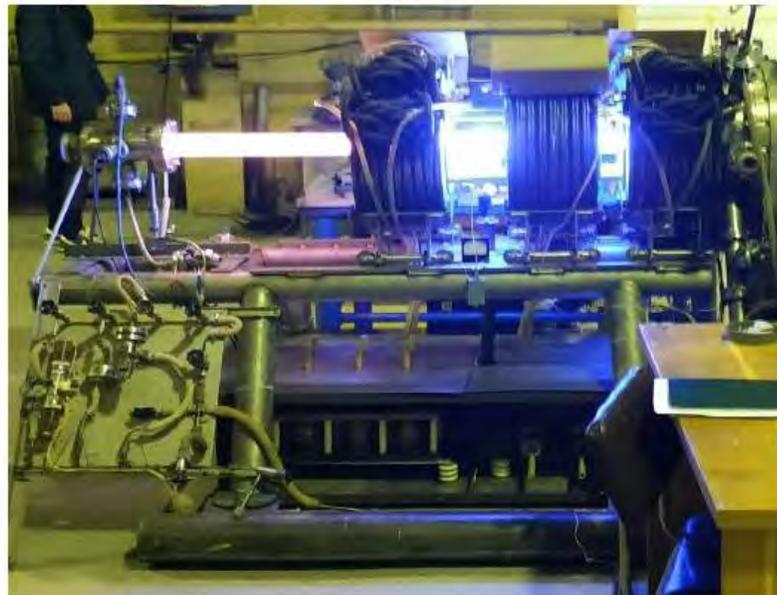
ВЧГ: 0,5 - 1,8 – 10 – 13,56 МГц

Газы: H_2 , He, Ar

Расход газа: 1-10 мкг/с

Магнитные системы:

Водоохлаждаемые и ВТСП до 1,5 Тл



Объем > 300 м³

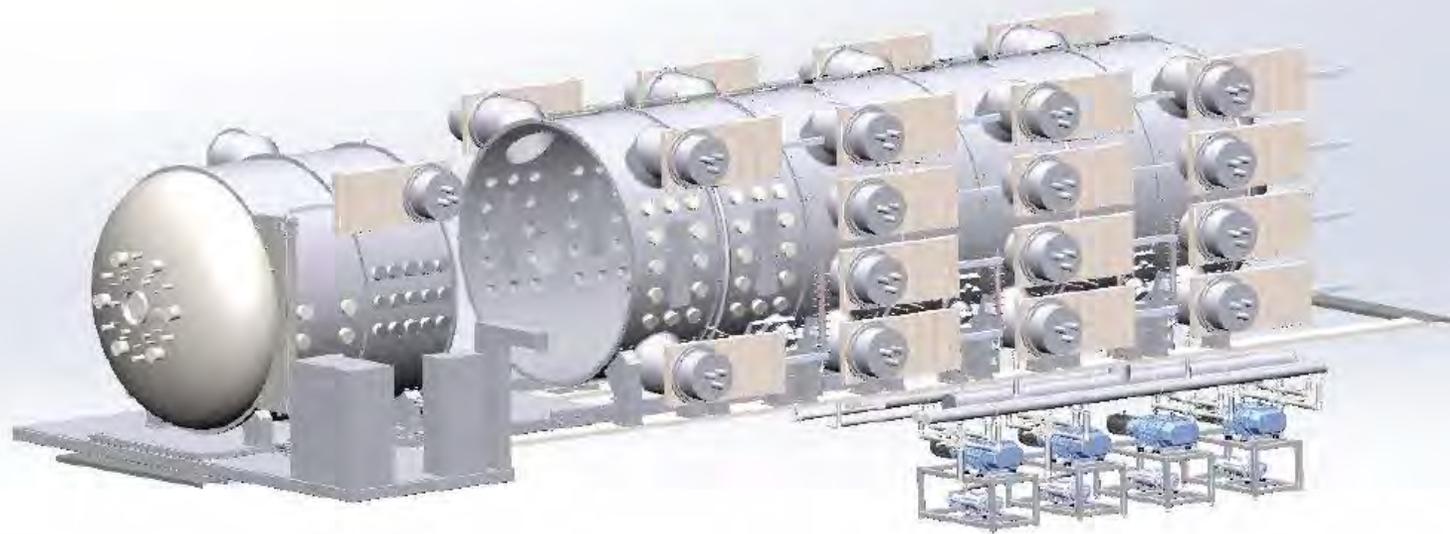
Диаметр 5 м

Мощность БПРД до 300 кВт

Расход Ar до 0,1 г/с

16 крионасосов ДУ 900

Скорость откачки > 400 м³/с



Основные задачи:

- Создание научно-технологической стендовой базы для проведения **испытаний** элементов и оптимизации параметров лабораторных образцов безэлектродных плазменных ракетных двигателей, в части:
 - **Исследования и оптимизация работы ВЧ средств генерации и нагрева плазменного потока;**
 - **Измерения параметров плазмы и их зависимости от режимов работы.**
- Создание стенда «ПЕРСТ» для **отработки** элементов, макетов и прототипов безэлектродных плазменных ракетных двигателей мощностью до 0,3 МВт.



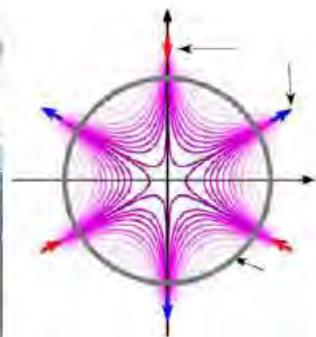
РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА, СОЗДАВАЕМОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛОМ ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ ТОКАМАКА

Федорович С.Д.¹, Чан Куанг В.¹, Кавыршин Д.И.^{1,2}, Будаев В.П.^{1,3}, Карпов А.В.^{1,3}, Лукашевский М.В.¹, Rogozin К.А.¹,
Коньков А.А.¹, Анисимов Д.А.¹

¹НИУ «МЭИ», Москва, Россия, FedorovichSD@mail.ru

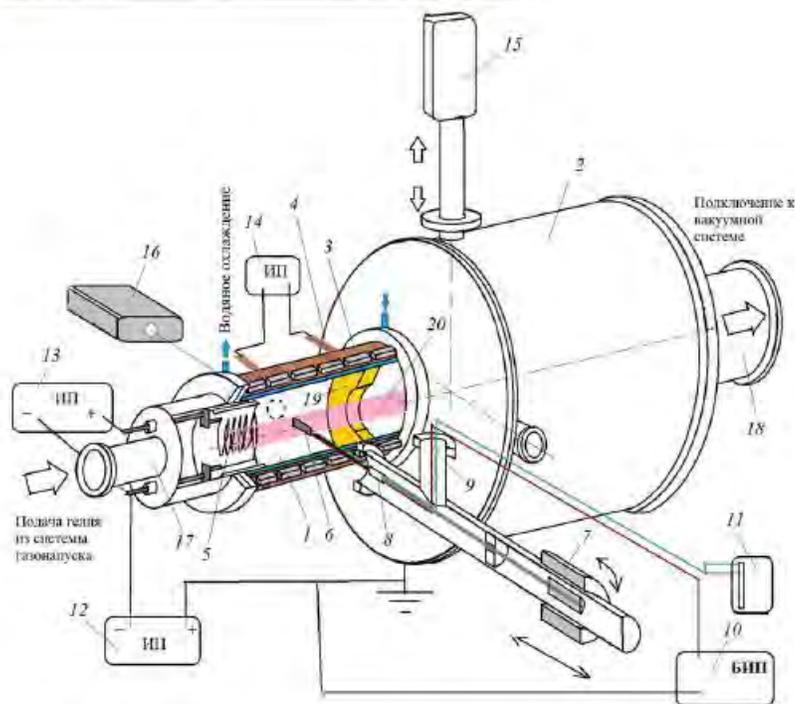
²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия, dimakav@rambler.ru

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, budaev@mail.ru



Параметры плазменной установки ПЛМ-М

- Диаметр разрядной камеры/плазменного пучка - 15/4 см;
- Диаметр ресивера 100 см, длина 200 см;
- Продольное магнитное поле 0,025 - 0,035 Тл;
- Магнитная ловушка 8-польный мультикасп;
- Индукция магнитного поля вблизи стенок камеры до 0,2 Тл;
- Плотность гелиевой плазмы $(0,1 - 2) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$;
- Электронная температура 2 – 10 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ;
- Ионный поток из плазмы на тестовый образец до $10^{23} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;
- Мощность плазменно-тепловой нагрузки на испытываемые образцы 0,4 – 4 МВт/м²;
- Диаметр плазменного пучка - 4 см;
- Длительность разряда – стационарная, 500 мин и более;
- Охлаждение модулей стенки и мишеней – стационарное.



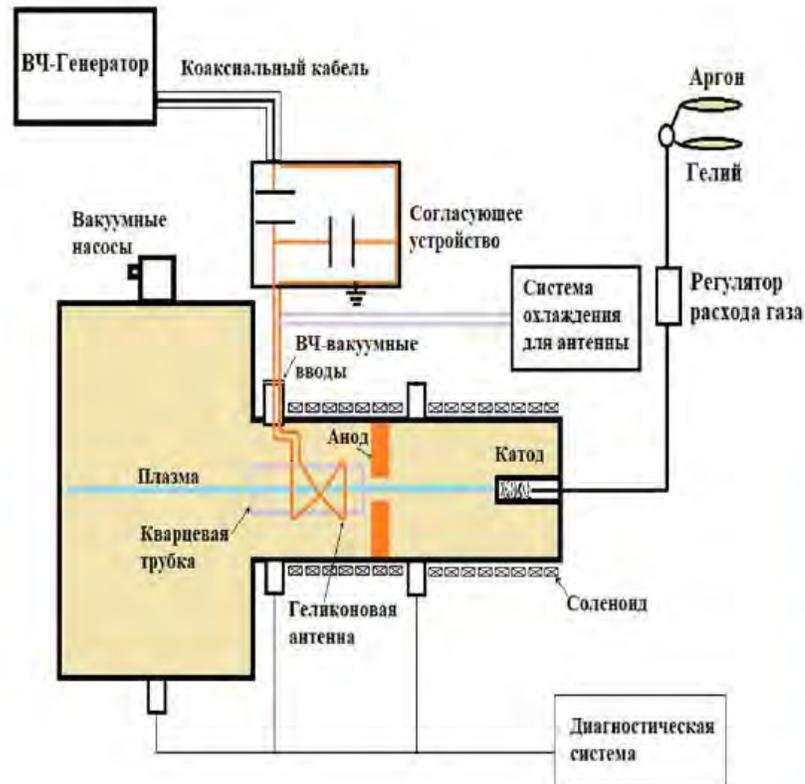
Блок-схема установки ПЛМ-М

Установка ПЛМ-М создана на основе установки ПЛМ в 2019-2020 г. при поддержке Росатома.

Параметр	PLM-M Россия	NAGDIS -II Япония	PISCES-A dc arc США	PISCES-B dc arc США	AIT-PID Япония
Магнитное поле, Тл	0,03/ 0,2	0,25	0,1	0,04	0,01
Диаметр плазмы, см	4	2	5	5	3
T_e , эВ	2-7	10	~6	~6	4
n_t , 10^{18} м^{-3}	5-10	100	~5	~10	10
Ионный поток на мишень Γ , 10^{22} $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	5-11	10	0,5-8	5-20	0,3
Максимальный ионный флюенс на мишень, Φ , 10^{27} м^{-2}	8	1	1	10	1
Энергия ионов в потоке на мишень, эВ	1-100	10-200	10-300	10-200	1-100

Система ВЧ-нагрева в установке ПЛМ-М

ВЧ-источники – мощность до 5кВт, частоты 27,12 МГц и 13,56 МГц



Охлаждаемая геликоновая антенна

Развитие технологий плазменного электрореактивного двигателя: стационарные плазменные потоки с дополнительным ВЧ-нагревом геликоновой антенной.

Система ВЧ-нагрева должна обеспечить плотность электронов до 10^{20} м^{-3} , температура электронов 15 эВ и более. Коэффициент поглощения ВЧ-мощности плазмой выше 80 %. (В предварительных экспериментах достигнуто значение 80 %).

Спасибо за внимание