

**В.Б. Минаев**  
**от лица коллектива установки Глобус-М2**

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

*при участии*

*АО "НИИЭФА", Санкт-Петербург*

*ООО ИФТ, Санкт-Петербург*

*ИЯФ СО РАН, Новосибирск*

*АО "Спектрал-Тех", Санкт-Петербург*

# **Статус программы научных исследований на сферическом токамаке Глобус-М2**

# Содержание

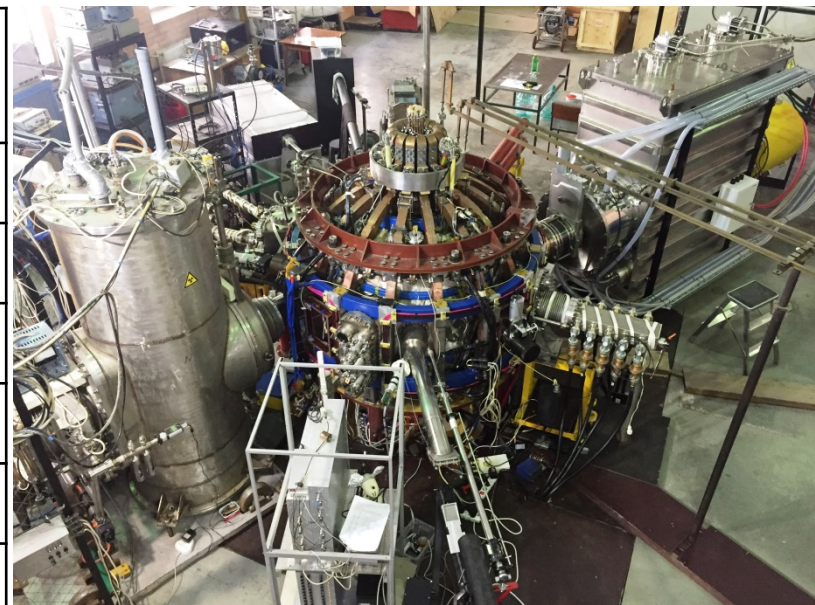
- **Сферический токамак Глобус-M2**
- **Основные результаты проведенных экспериментов и подготовка к новой кампании**
- **Комплексы нагрева и диагностики плазмы**
- **Задачи и планы**

# Сферический токамак Глобус-М2

- **Параметры токамака Глобус-М2**
- **Исследовательский комплекс токамака Глобус-М2**

# Параметры токамака Глобус-М2

	Глобус-М	Глобус-М2 (проект / эксперимент)
<b>R, m</b>	0.36	0.36
<b>a, m</b>	0.24	0.24
<b>R/a</b>	1.5	1.5
<b><math>B_{tor}</math> (on axis), T</b>	0.4	1.0 / 0.9
<b><math>I_{pl}</math>, MA</b>	0.2	0.5 / 0.43
<b><math>\kappa</math></b>	$\leq 2.0$	$\leq 2.0 / \leq 2.0$
<b><math>\delta</math></b>	$\leq 0.5$	$\leq 0.5 / \leq 0.4$
<b><math>\Psi_{pol}</math>, Wb</b>	0.33	0.4
<b><math>B_{tor}/R</math>, T/m</b>	$\leq 1.1$	$\leq 2.7$
<b><math>t_{pulse}</math>, S</b>	0.15	0.4
<b>NBI [E, keV \ P, MW]</b>	30 \ 1	40 \ 1 + 50 \ 1
<b>ICRH [f, MHz / P, MW]</b>	7.5 \ 0.3	6.0-15.0 \ 0.5
<b>LHCD [f, GHz / P, MW]</b>	0.9 \ 0.1	2.45 \ 0.5



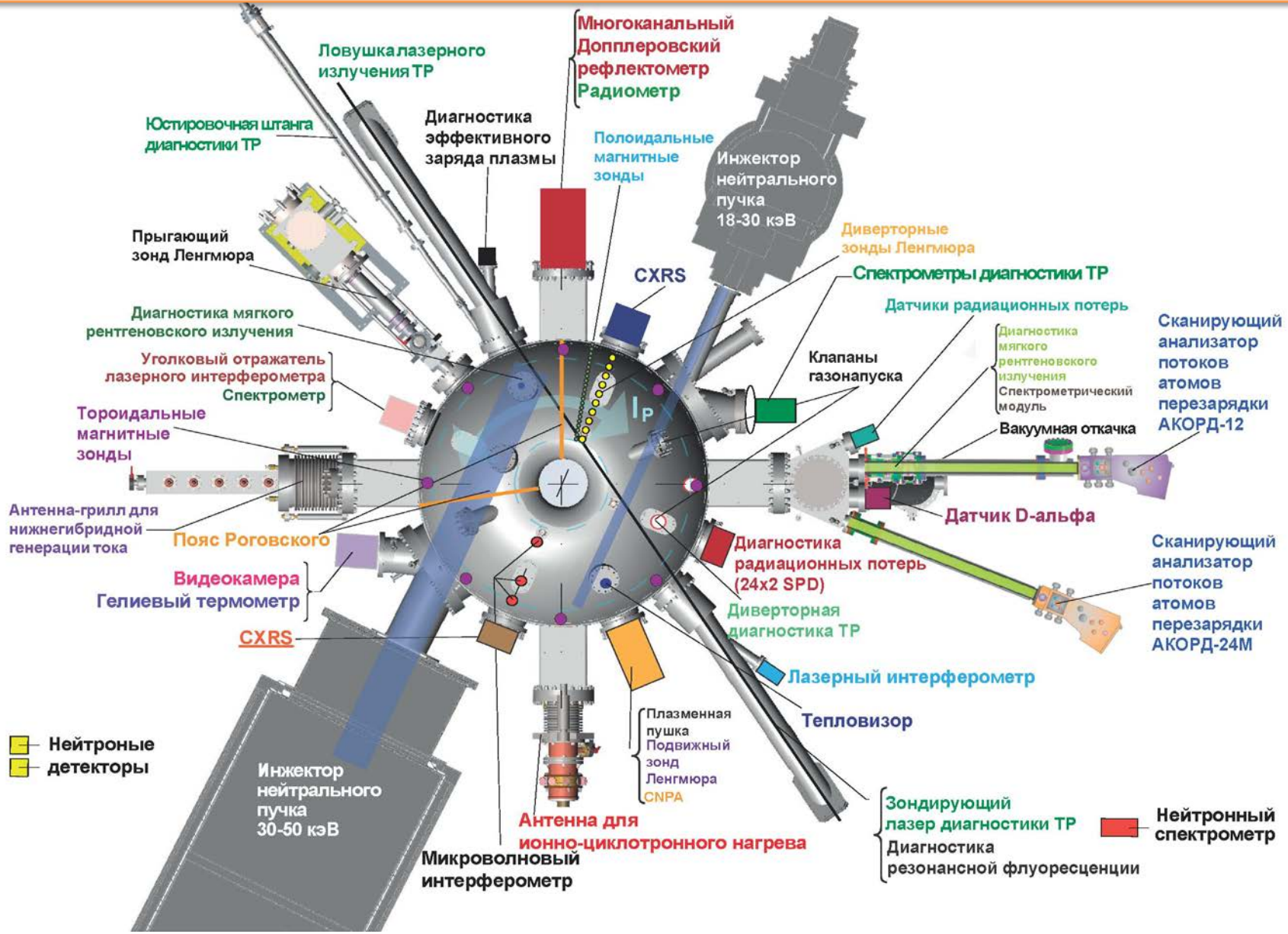
Изменилось:

- Новая ЭМС;
- Новые источники питания ЭМС ;
- Модернизированные системы дополнительного нагрева и генерации безындукционного тока плазмы.

Сохранилось:

- Разрядная камера;
- Система откачки.

# Исследовательский комплекс токамака Глобус-М2



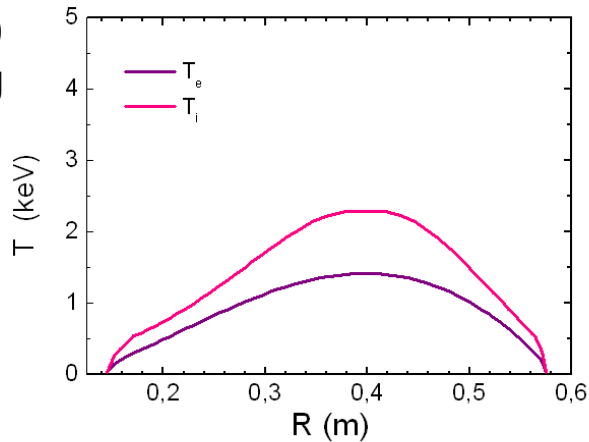
# Основные результаты проведенных экспериментов и подготовка к новой кампании

- Главные результаты 2020-2022
- Потери быстрых ионов, инициируемые ТАЕ
- Снижение нагрузки на дивертор
- Реновация первой стенки
- Достигнутые параметры

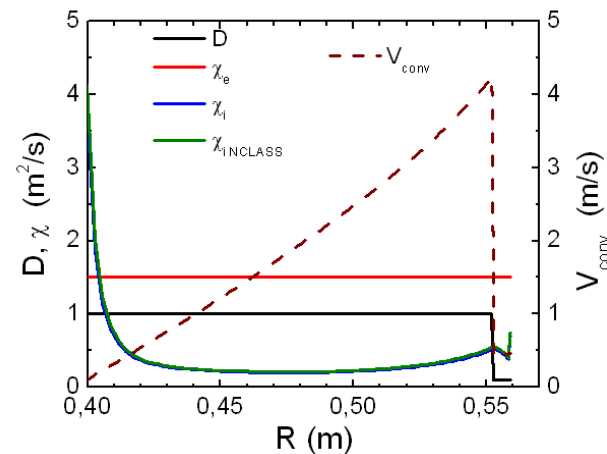
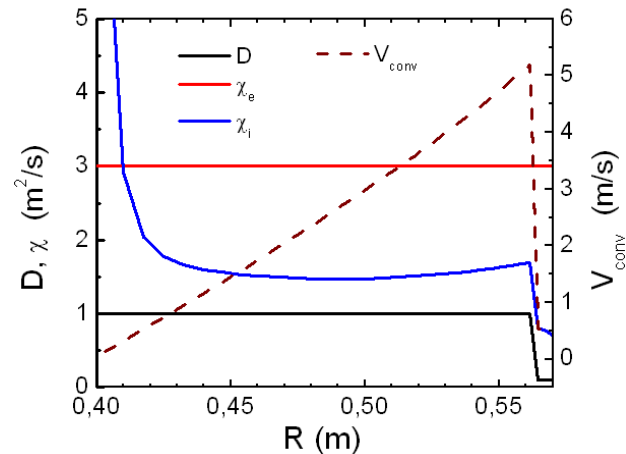
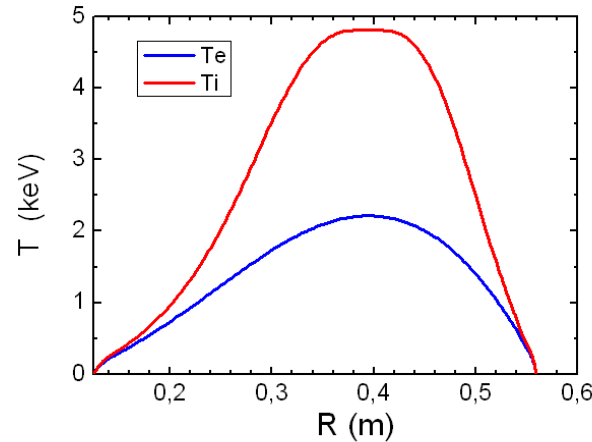
# Моделирование с помощью кода ASTRA (2012)

При увеличении  $B_T$  до 1Т и  $I_p$  до 0.5 МА  
 характеристики плазменного разряда существенно улучшаются

ITER-H98p(y,2)  
 scaling



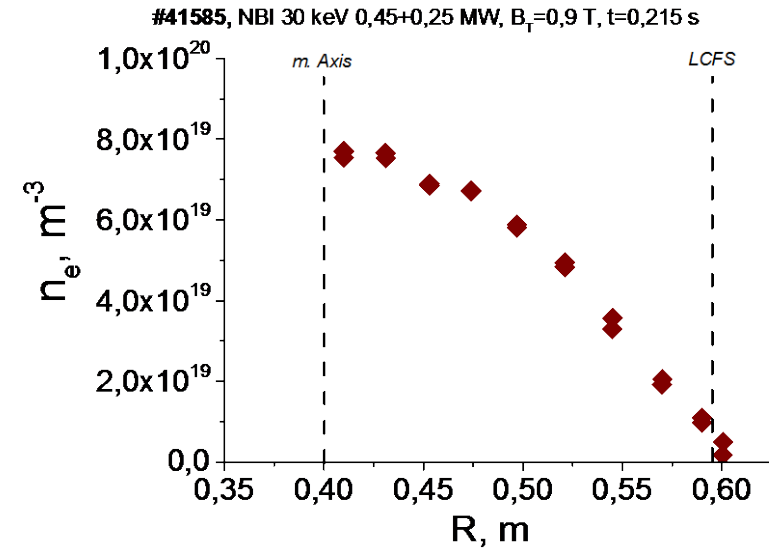
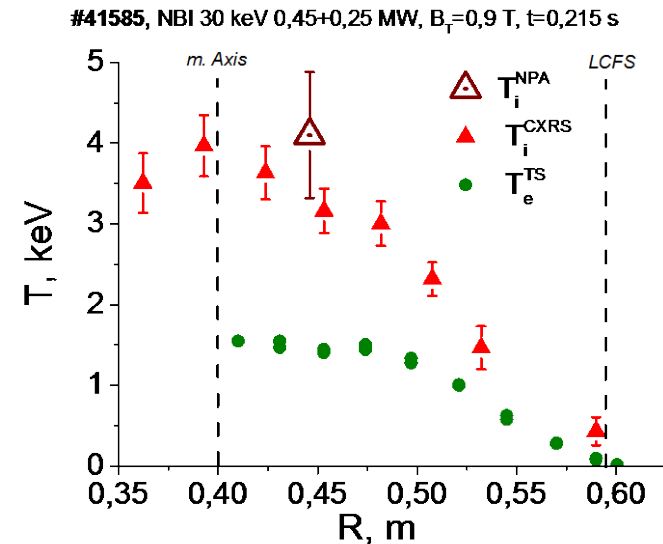
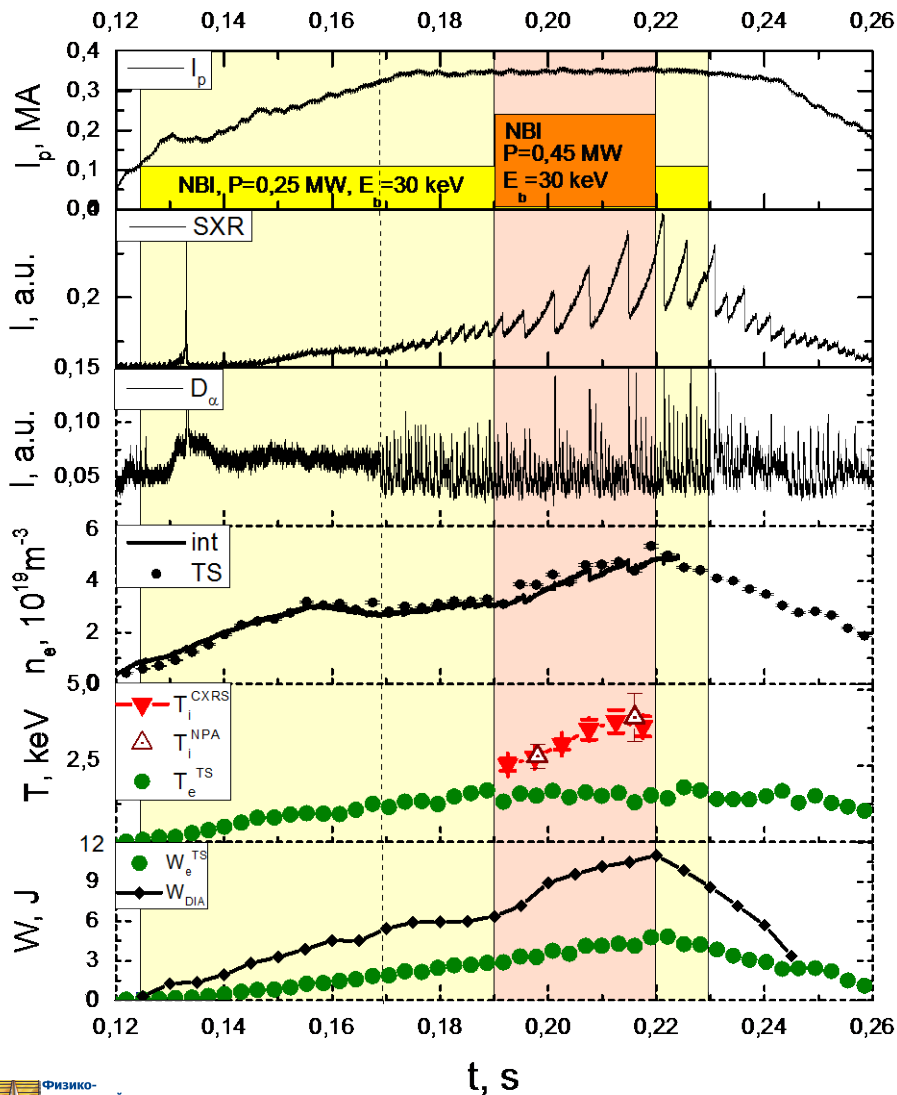
ST scaling



D-NBI (30 keV, 1 MW)  $\rightarrow$  D plasma ( $\langle n_e \rangle \sim 0.7 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ )

# Режим с горячими ионами ( $T_i = 4$ кэВ) получен при инъекции пучков суммарной мощностью 0.7 МВт

Globus-M2 #41585,  $B_T=0,9$  Т,  $I_p=0.35$  МА,  $\langle n_e \rangle=(4-5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $\tau_E \approx 10$  мс,  $V_T \approx 150$  км/с

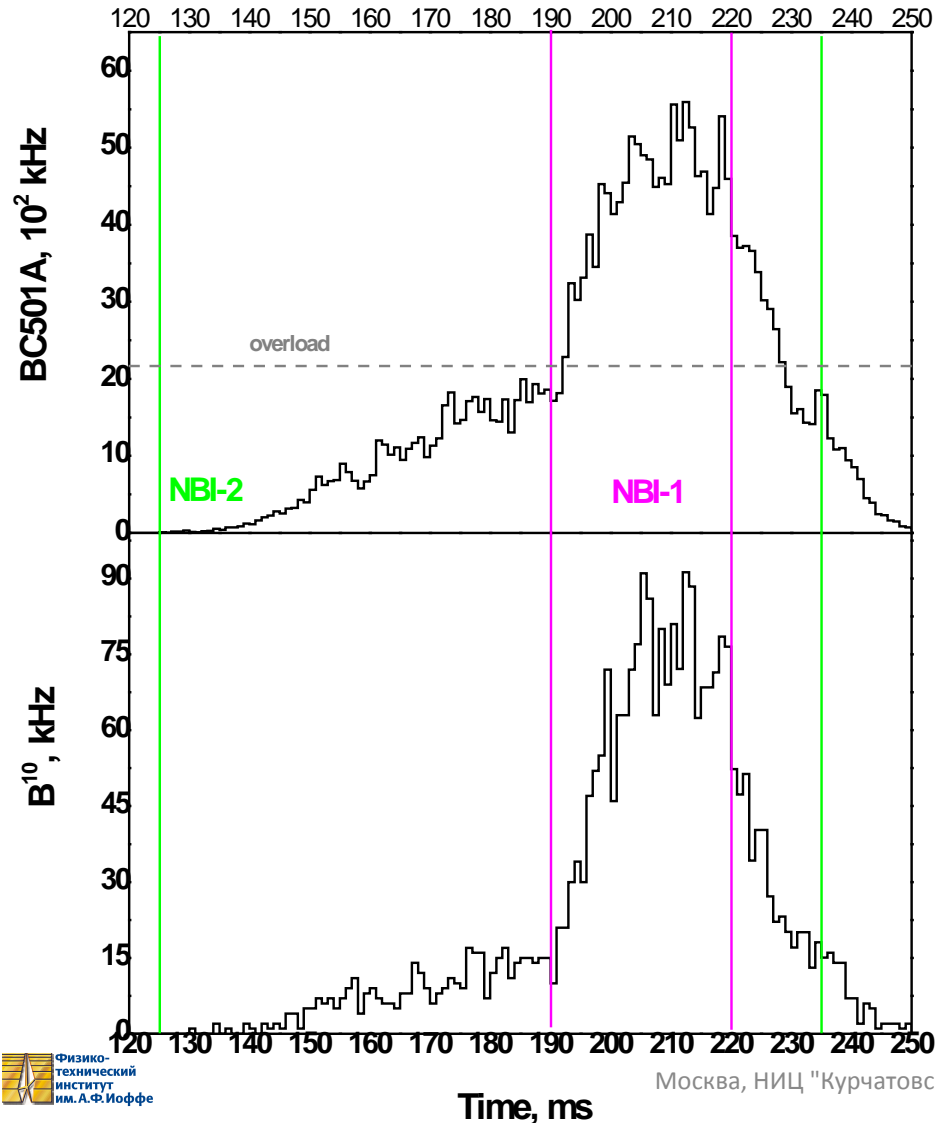




# С увеличением магнитного поля существенно вырос нейтронный выход

#41585:  $B_T=0.9$  Тл,  $I_p=0.35$  МА,  $\langle n_e \rangle=(4-5)\cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>,

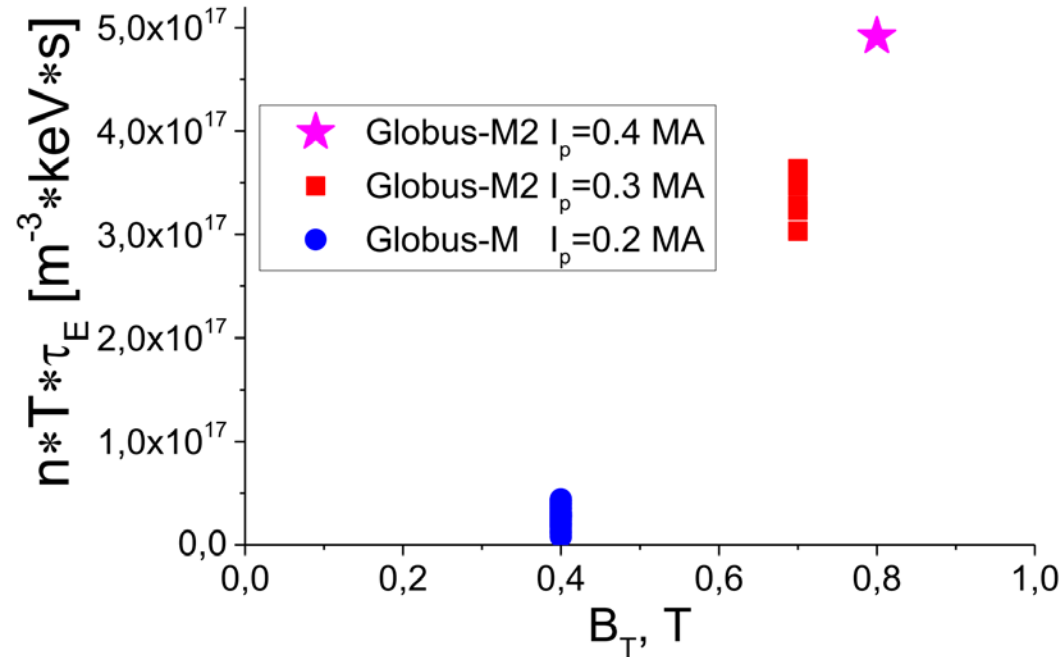
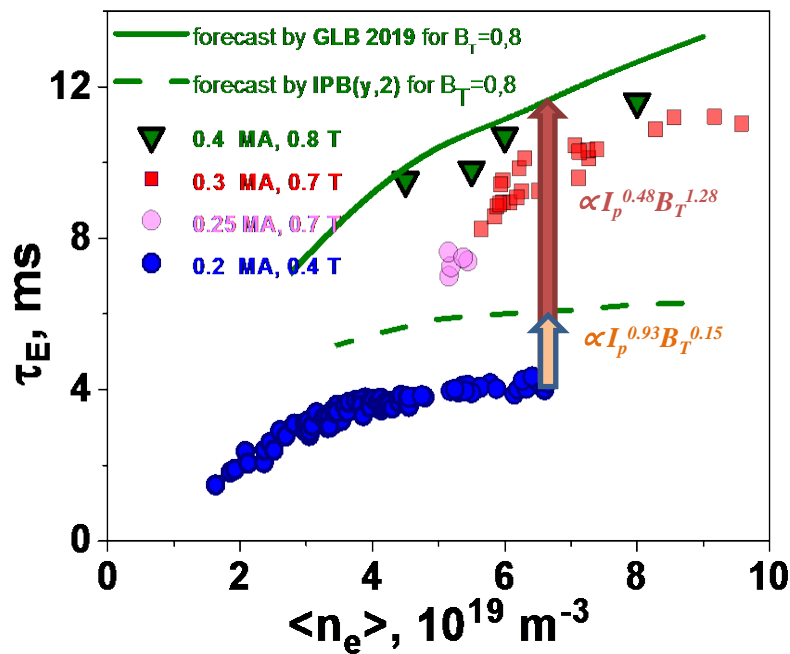
D-NBI: 30 кэВ, 0.25+0.45 МВт



➤ **Полный поток DD нейтронов превысил  $10^{12}$  с<sup>-1</sup>. В пересчете на DT реакцию это более  $10^{14}$  с<sup>-1</sup>.**

- Разработана, изготовлена и установлена защита нейтронных детекторов.
- Проведена калибровка диагностики с помощью эталонного источника.

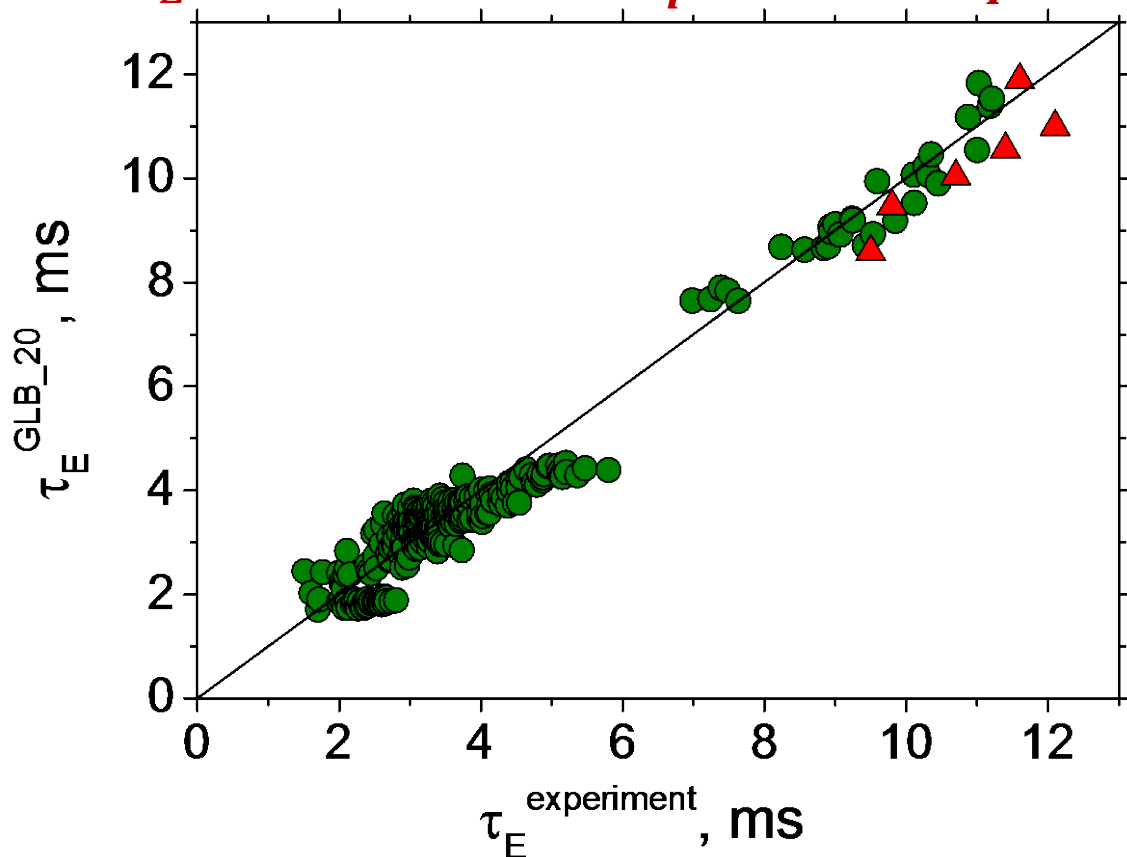
# Увеличение $B_T$ с 0.4 до 0.8 Тл приводит к 4-х кратному росту тепловой энергии и 3-х кратному росту времени ее удержания



- Увеличение тороидального магнитного поля с 0.4 до 0.8 Тл привело к увеличению значения  $n \cdot T \cdot \tau_E$  на порядок за счет четырехкратного роста температуры и трехкратного увеличения времени удержания энергии.

# Время удержания энергии в сферическом токамаке растет линейно с увеличением $B_T$

$$\tau_E^{GLB\_2020} = 0.01 \cdot I_p^{0.43 \pm 0.22} \cdot B_T^{1.19 \pm 0.1} \cdot P_{abs}^{-0.59 \pm 0.23} \cdot n_e^{0.58 \pm 0.1}$$



- Для сферических токамаков в исследованном диапазоне  $B_T$  (до 0.8 Тл) и  $I_p$  (до 0.4 МА) подтверждена сильная зависимость времени удержания энергии от магнитного поля, отличающаяся от скейлинга ИТЭР:

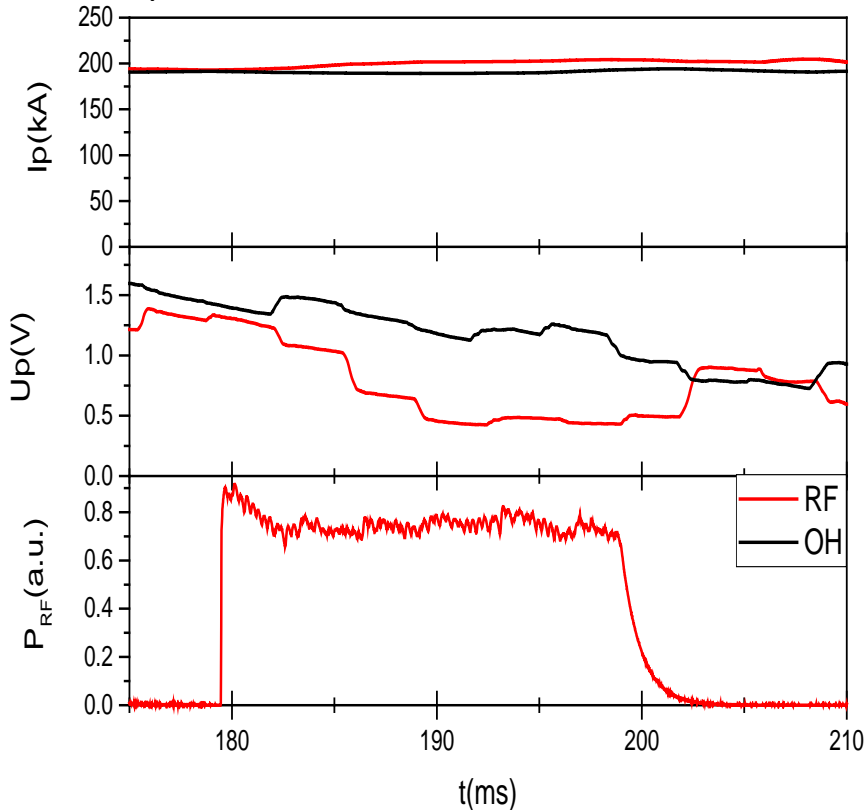
$$\tau_E^{IPB98(y,2)} \sim I_p^{0.93} \cdot B^{0.15} \cdot P_{abs}^{-0.69} \cdot n_e^{0.41}$$

- С учетом данных, полученных со сферических токамаков START, MAST, NSTX, построен скейлинг для времени удержания энергии, учитывающий размер установки:

$$\tau_E^{scal} = 0.066 \cdot I_p^{0.53} \cdot B_T^{1.05} \cdot P_{abs}^{-0.58} \cdot n_e^{0.65} \cdot R^{2.66} \cdot \kappa^{0.78}$$

# Генерация тока увлечения с помощью волн НГ диапазона демонстрирует обычную для токамаков эффективность

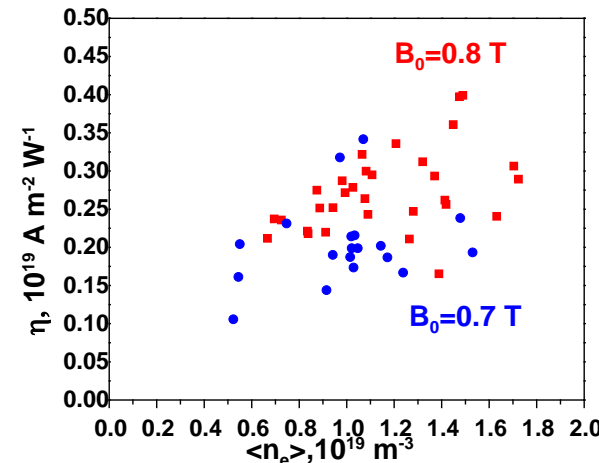
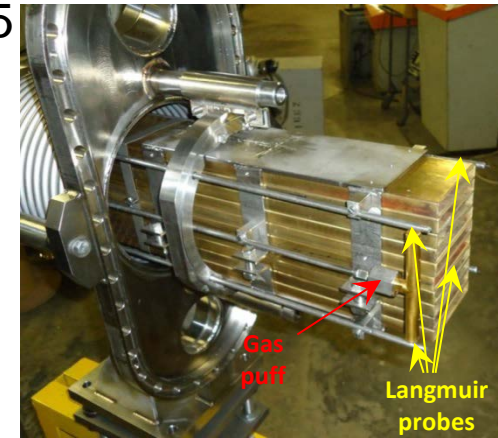
Тороидальное замедление волны накачки  
# 38686/38694



$B_t = 0.8$  Тл;  $I_p = 200 - 250$  кА,  
 $\langle n_e \rangle = (1.0 - 1.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$   
 $T_e(0) = 500$  эВ,  $Z_{\text{eff}} = 2,5$

$f = 2.45$  ГГц  
 $P_{\text{LH}} = 150-200$  кВт,  
 $N_{\text{tor}} = -3.0$   
 $N_{\text{pol}} = -2,8$

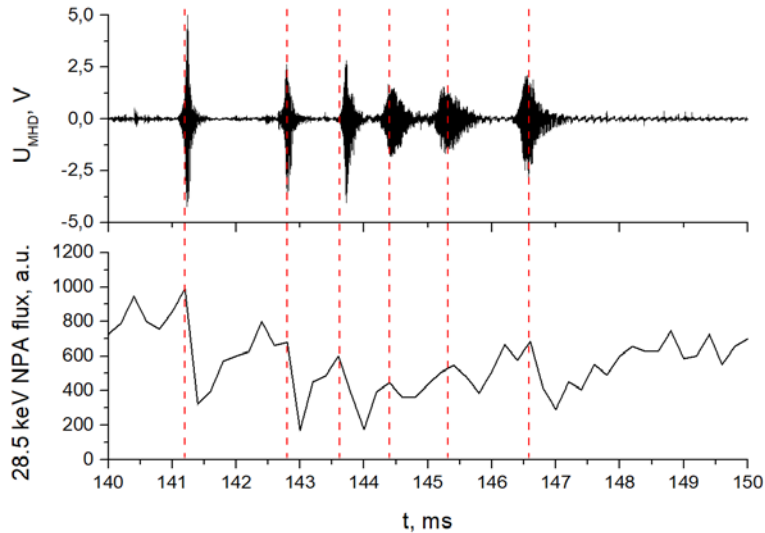
$I_{\text{LHCD}} > 50\% I_p$   
 $\eta = (0.2 - 0.4) \cdot 10^{19} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} / \text{Вт}$



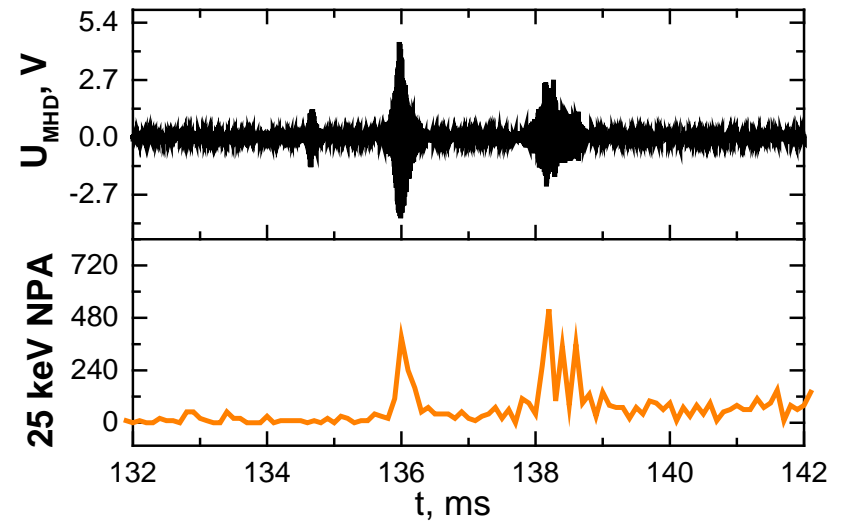
➤ **Продемонстрирована эффективность генерации безындукционного тока на уровне традиционных токамаков**

# Вспышки ТАЕ приводят к транспорту быстрых ионов из центра на периферию

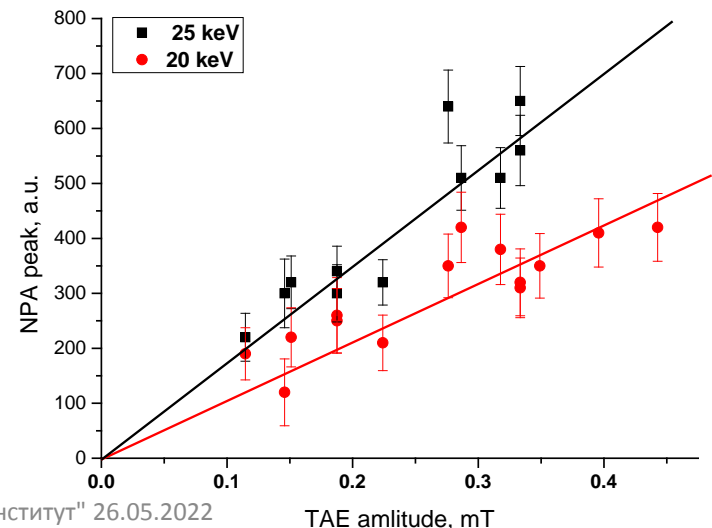
Транспорт быстрых ионов из центральной области ( $Z = 0$ )



Транспорт быстрых ионов на периферию - в область потерь ( $Z = -14$  см)



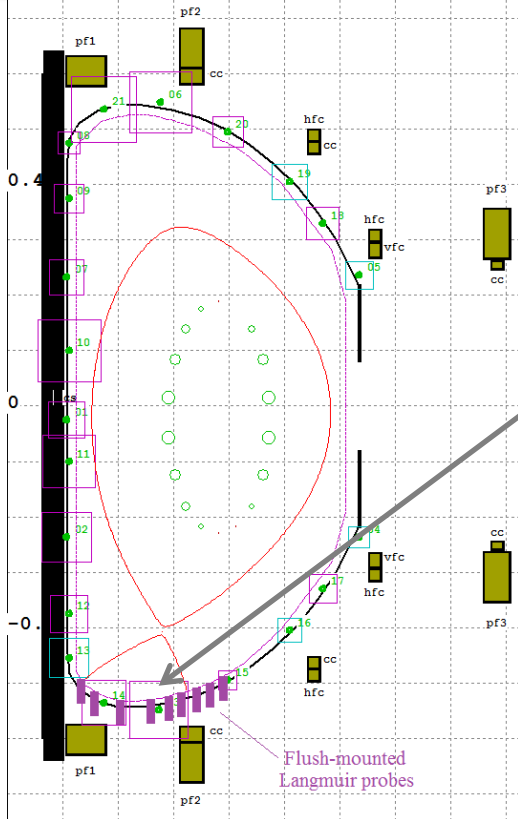
NPA, транспорт на периферию (потери)



- Вспышки ТАЕ приводят к транспорту быстрых ионов из центра на периферию, что отражается на сигналах NPA, детектора нейтронов и болометров на основе кремниевых фотодиодов (SPD)
- Величина потерь от амплитуды ТАЕ демонстрирует линейную зависимость.

# Уменьшение тепловой нагрузки на диверторные пластины в 10 и более раз достигается напуском азота

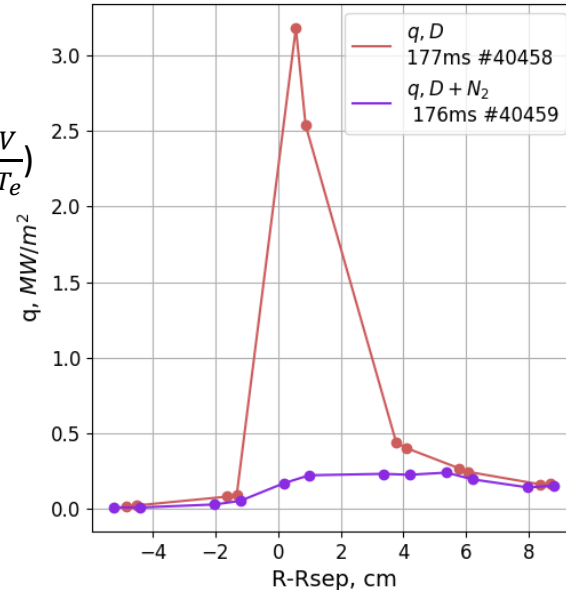
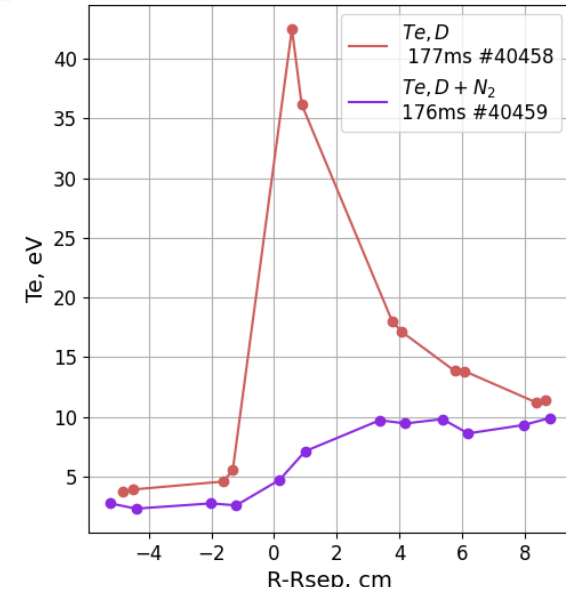
10 плоских диверторных зондов в графитовых пластинах нижнего купола



Плотность потока тепла на пластины:

$$q = \gamma k T_e I_{isat} / (e S_{pr}),$$

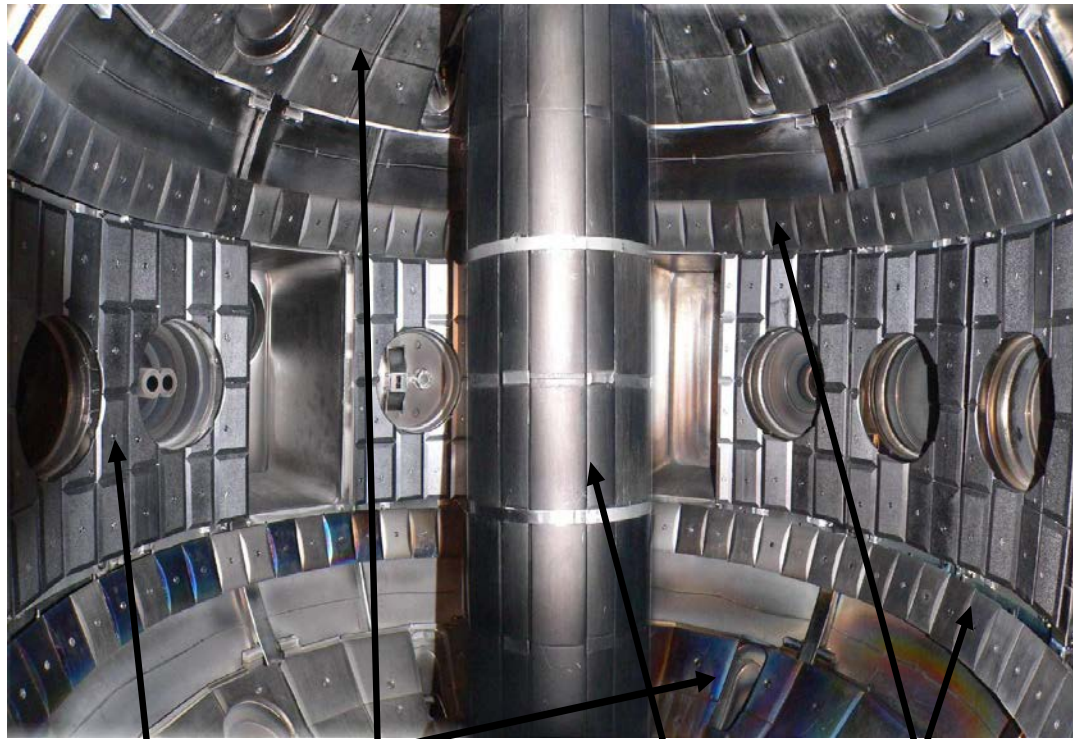
$$\gamma(V) = 2.5 \frac{T_i}{T_e} - \frac{eV}{kT_e} + 2 \left[ \left( 2\pi \frac{m_e}{m_i} \right) \left( 1 + \frac{T_i}{T_e} \right) \right]^{-1/2} \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right)$$



- Напуск азота приводит к уменьшению плотности теплового потока более чем на порядок без существенного ухудшения режима удержания плазмы внутри сепаратрисы.

# Первая стенка разрядной камеры защищена пластинами из рекристаллизованного графита

Внутренняя поверхность разрядной камеры



Equatorial tiles  
RG-Ti-91-B  
7.5wt% Ti,  
0.3wt% B  
Installed in 2000

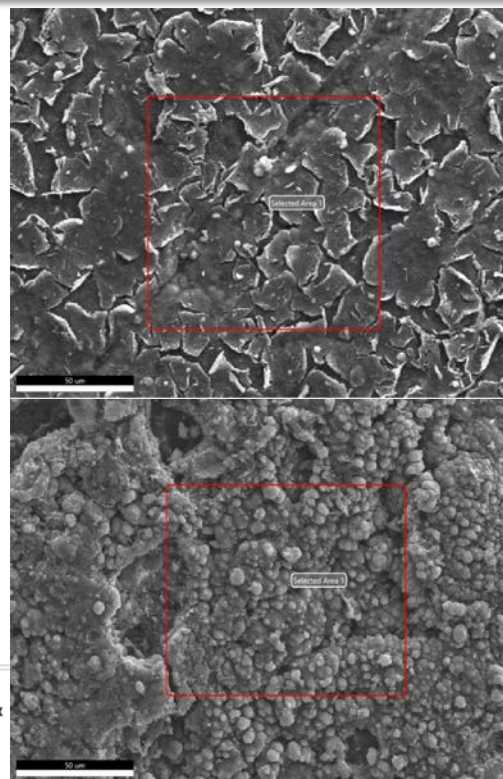
Divertor tiles  
RG-Ti-91-Si  
7.5wt% Ti,  
1.1wt% Si  
Installed in 2003

Inner limiter  
RG-Ti-91  
7.5wt% Ti  
Installed in 2000

Toroidal limiters  
RG-Ti-91-B  
7.5wt% Ti,  
0.3wt% B  
Installed in 2006

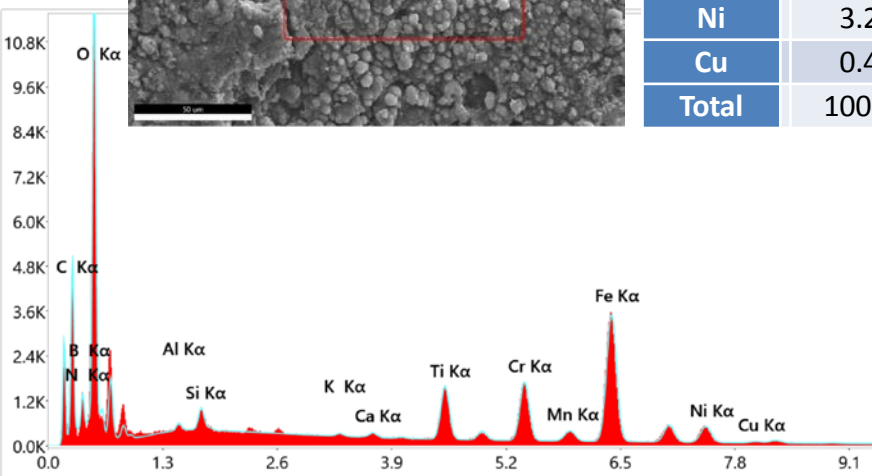
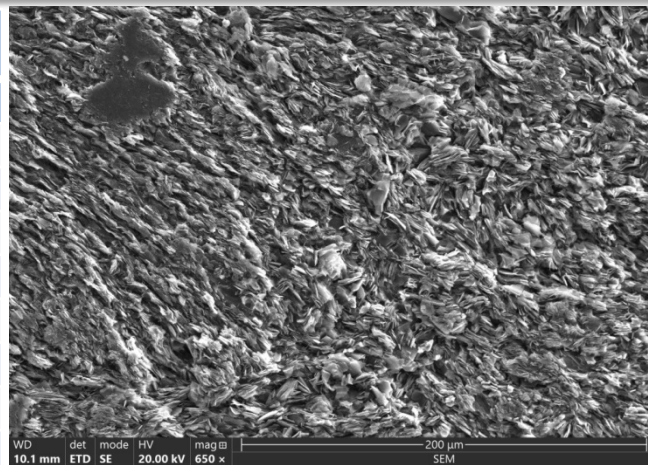
- Прогрев до 200°C
- Газоразрядная очистка поверхности:  
тлеющий разряд в гелии в течение нескольких часов;  
плотность тока 30 мкА/см<sup>2</sup>;  
напряжение 300 В;  
камера является катодом.
- Боронизация первой стенки:  
тлеющий разряд в смеси гелия и паров карборана C<sub>2</sub>B<sub>10</sub>H<sub>12</sub> в соотношении 3/1-5/1.  
В свежей аморфной пленке соотношение В/С 48%/52%.  
После 1.5 часа толщина осажденной пленки составляет 0.3-1.2 мкм.

# Глубокая очистка графитовых пластин первой стенки позволила удалить все тяжелые примеси

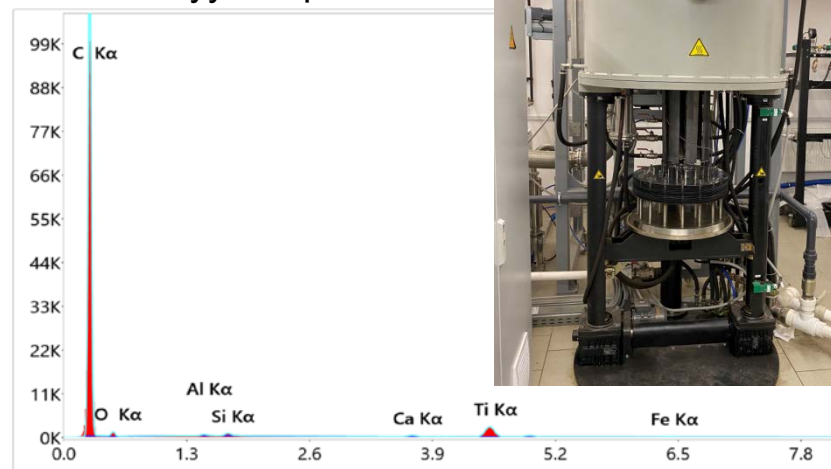


Element	Wt%
B	5.3
C	20.1
N	4.7
O	40.3
Al	0.2
Si	0.4
K	0.1
Ca	0.2
Ti	3.4
Cr	4.8
Mn	0.5
Fe	16.4
Ni	3.2
Cu	0.4
Total	100.0

Element	Wt%
C	86.9
O	5.9
Al	0.2
Si	0.5
Ca	0.4
Ti	5.5
Fe	0.5
Total	100.0



- Механическая обработка
- Мойка в УЗ ванне
- Отжиг в вакууме при 900 °С



Det: Octane Elite Super



# Достигнутые параметры плазменного разряда в токамак Глобус-М2

Параметр	Достигнутое значение
Магнитное поле	0,9 Тл
Ток плазмы	0,43 МА
Температура ионов	4 кэВ
Температура электронов	1,6 кэВ
Плотность (средняя)	$2,5 (1,5) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$
Запасенная плазмой энергия	16 кДж
Тройное произведение	$5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кэВ} \cdot \text{с}$
Нейтронный выход DD (эквив. DT)	$> 10^{12} (10^{14}) \text{ с}^{-1}$
Доля безындукционного тока (LHCD)	$> 60 \%$

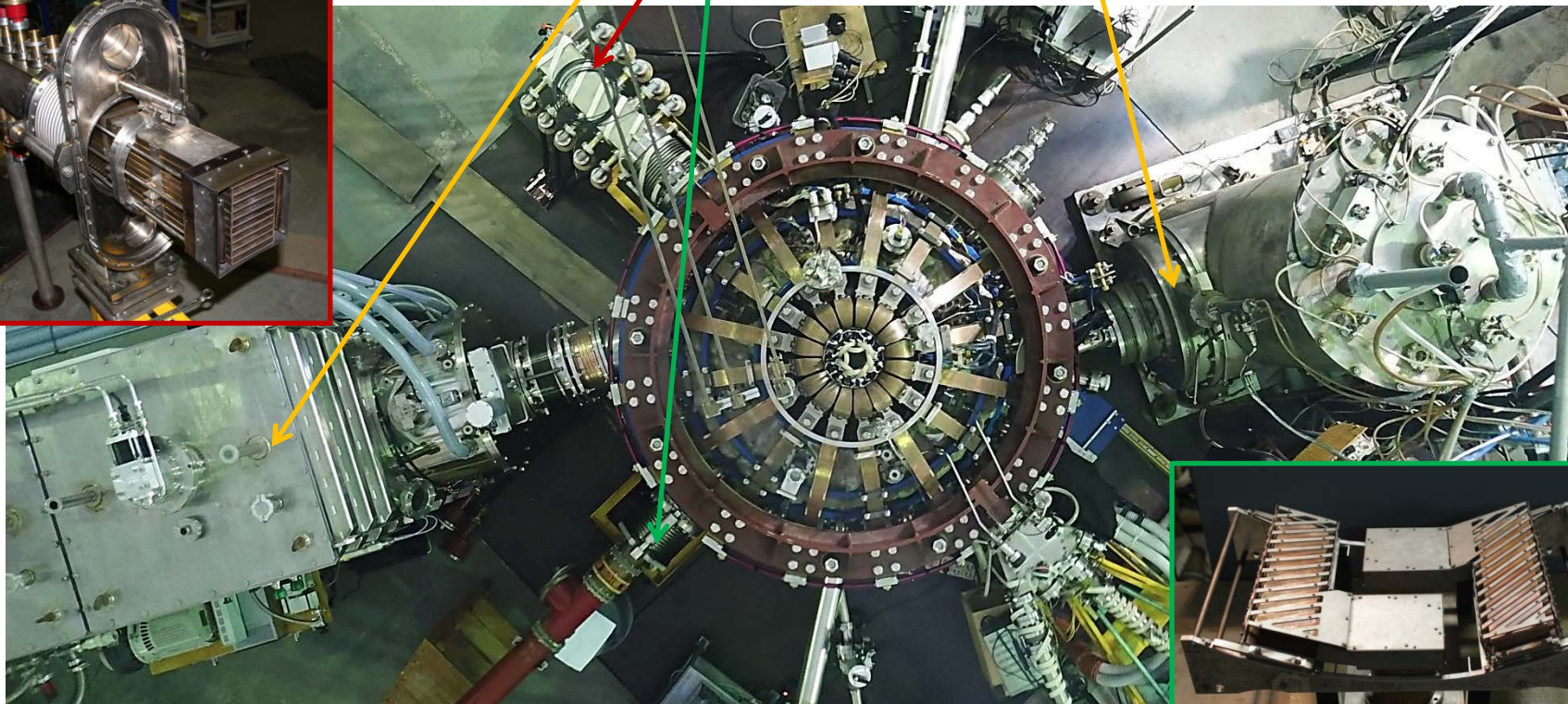
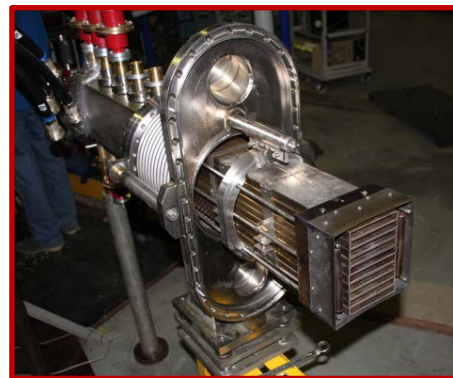
**По техническим параметрам и уровню проводимых исследований сферический токамак Глобус-М2 относится к классу установок Мегасайнс**

# Комплексы нагрева и диагностики плазмы

- **Дополнительный нагрев и безындукционное поддержание тока**
- **Диагностика томсоновского рассеяния**
- **Корпускулярная диагностика**
- **CXRS**
- **Дисперсионный ИК интерферометр**
- **Подвижный зонд Ленгмюра**
- **Нейтронная диагностика и Гамма - спектрометрия**

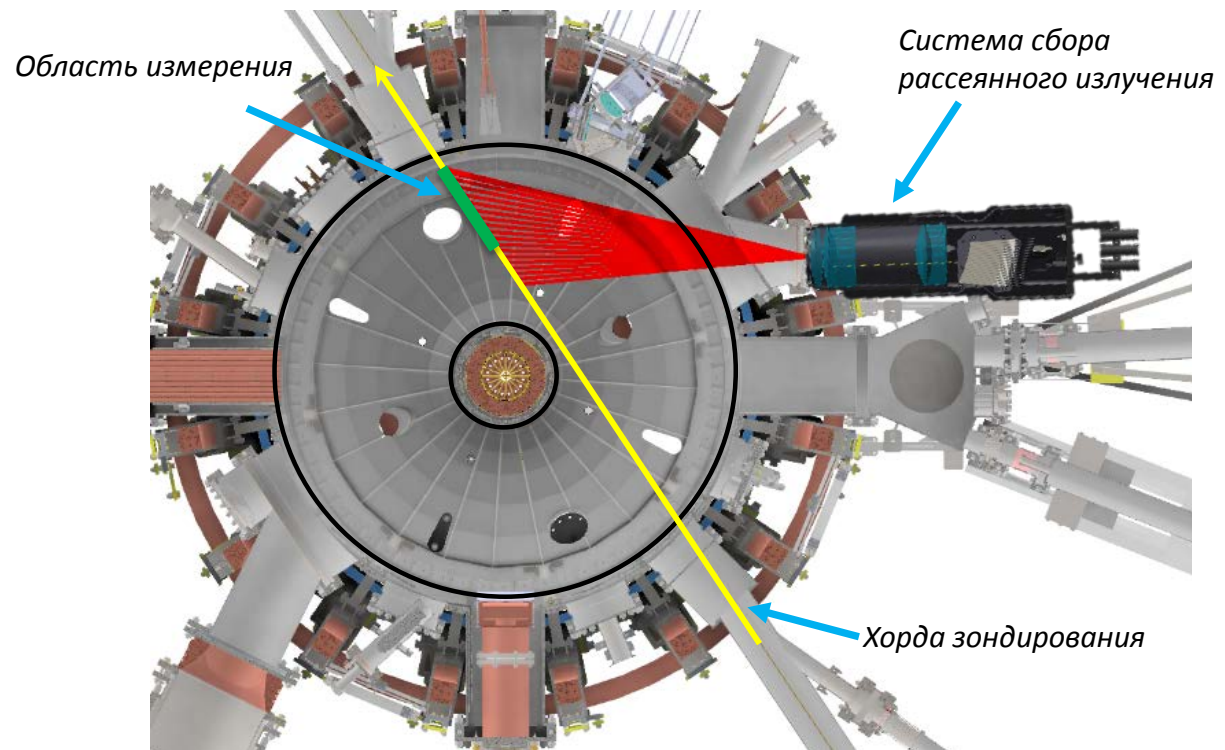
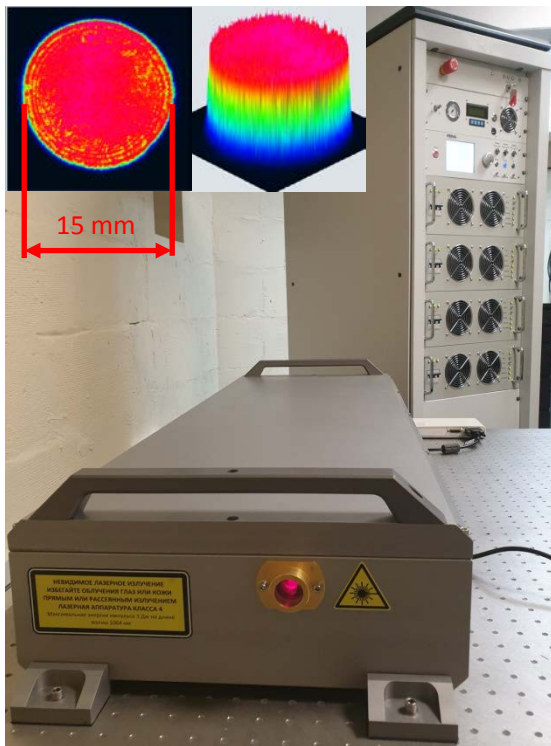
# Дополнительный нагрев и безындукционное поддержание тока

NBI	1 МВт, 18-40 кэВ 1 МВт, 25-50 кэВ	4 МВт/м <sup>3</sup>
LHCD	0.5 МВт, 2.45 ГГц	
ICRH	0.5 МВт, 6-15 МГц	



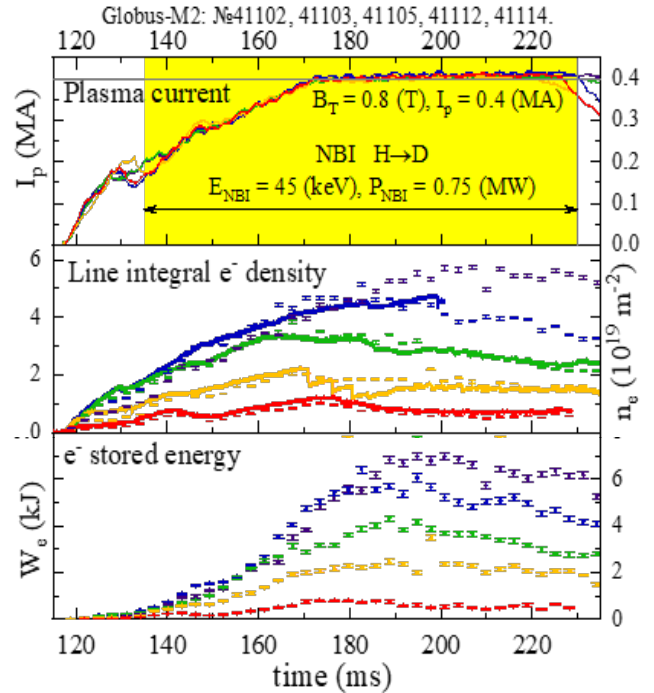
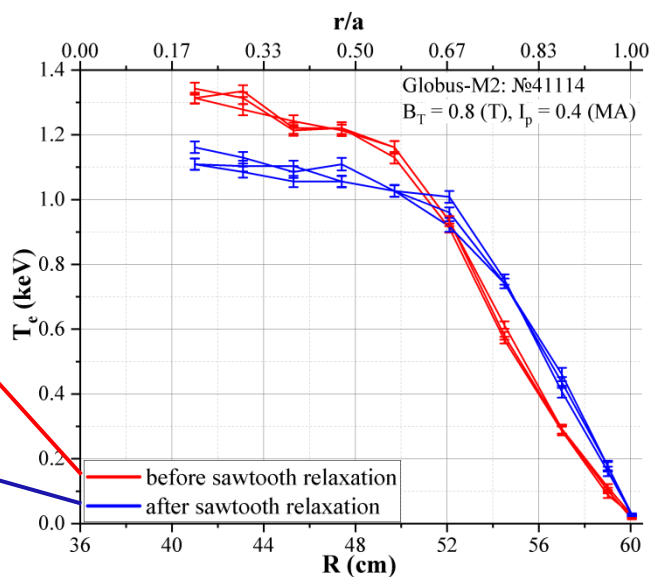
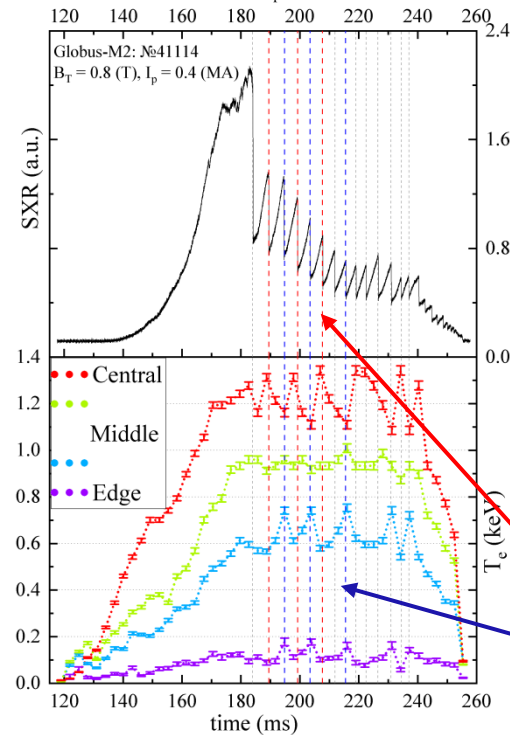
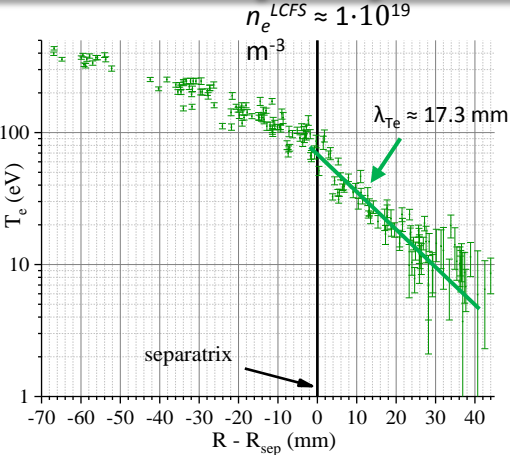
# Диагностика томсоновского рассеяния позволяет измерять профили $T_e$ и $N_e$ каждые 3 мс

- Зондирующий лазер DPSS Nd:YAG 1064 нм,  $E_L = 0,5-3$  Дж .
- Мониторинговые измерения  $n_e(R,t)$  и  $T_e(R,t)$  в непрерывном режиме с частотой 330 Гц.
- 10 пространственных точек (возможность увеличения до 20-30) с разрешением 10 - 20 мм, расположенных со стороны слабого магнитного поля от сепаратриссы до магнитной оси.
- Измерение температуры в диапазоне от 5 эВ до 5 кэВ, при плотности плазмы от  $5 \cdot 10^{17}$  до  $3 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup>.

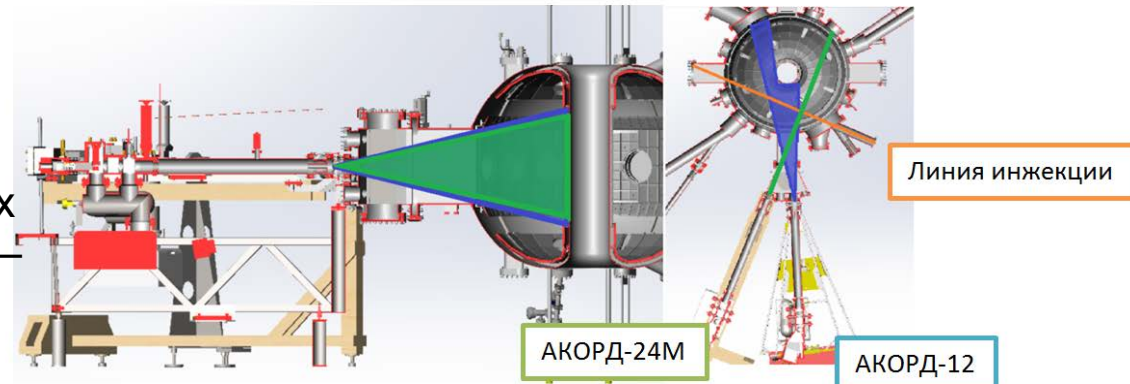


# Измерение параметров плазмы в SOL и динамика профилей в пилообразных колебаниях

- Возможность измерять распределения  $T_e$  и  $n_e$  в пристеночной области плазмы и как следствие оценить постоянную спада теплового потока в SOL
- Определить радиус инверсии при пилообразных колебаниях
- Совместный анализ данных TR и магнитной реконструкции позволяет определять динамику:
  - средней плотности плазмы
  - электронного энергозапаса плазмы

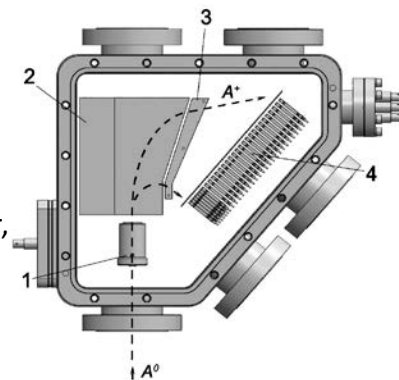


- Система сканирования обеспечивает возможность изменения линии наблюдения между выстрелами токамака в вертикальной плоскости для обоих анализаторов и в горизонтальной – для АКОРД-12.



- В случае разрядов с НИ реализуется вариант активной корпускулярной диагностики. Измерения локализованы в области пересечения пучка с линией наблюдения анализатора, что позволяет восстановить профиль ионной температуры или пространственное распределение быстрых ионов.

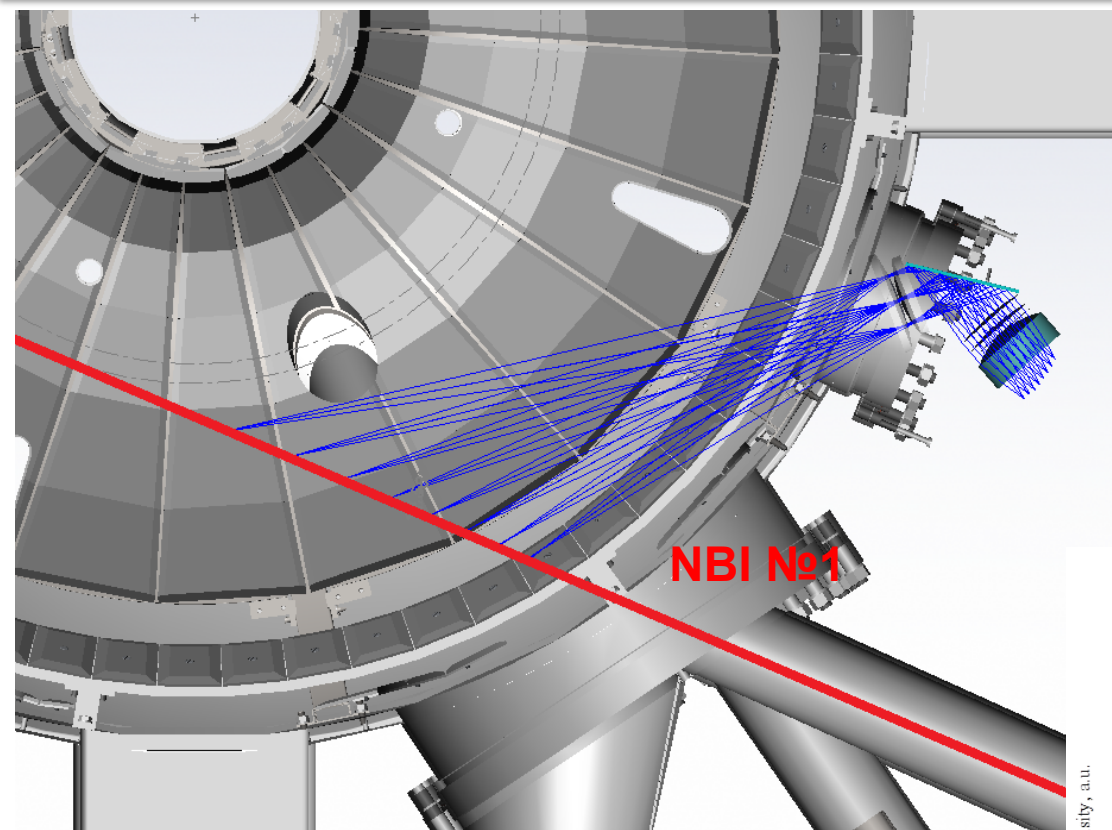
$A^0$  – поток атомов,  
 $A^+$  - вторичные ионы,  
 1 – модуль обдирки,  
 2 – постоянный магнит,  
 3 - конденсатор,  
 4 - детекторы.



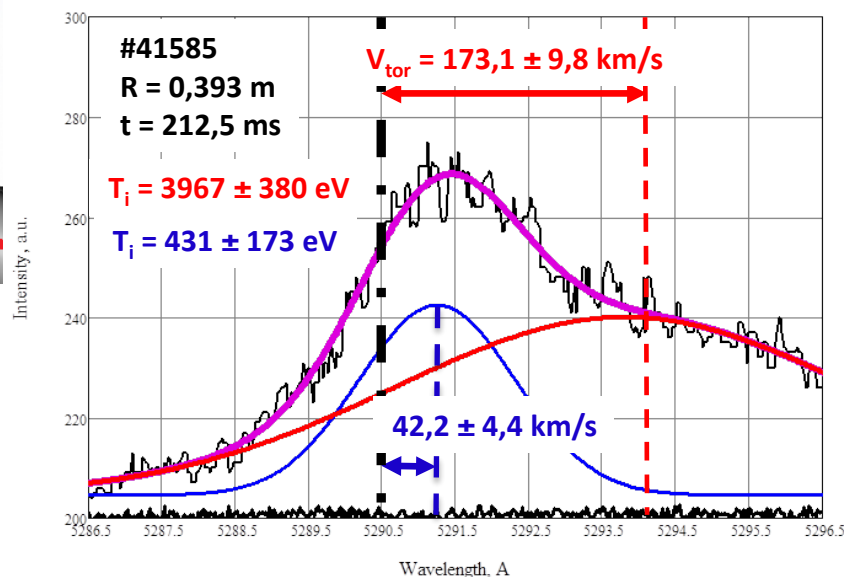
- Новый компактный анализатор CNPA-09 был испытан в эксперименте. Он позволяет одновременно регистрировать весь спектр по энергии от тепловой до энергии инжектируемого пучка и менее чувствителен к рассеянным магнитным полям.

Detecting atoms	$H_0$ or $D_0$
Energy range ( $H_0$ )	0.8 - 120 keV
Energy range ( $D_0$ )	0.8 - 60 keV
Mass suppression (H/D)	100
Number of energy channels	44
Energy resolution (for 15-50 keV)	10 %
Time resolution	100 $\mu$ s

# CXRS измеряет профиль ионной температуры и скорость тороидального вращения плазмы

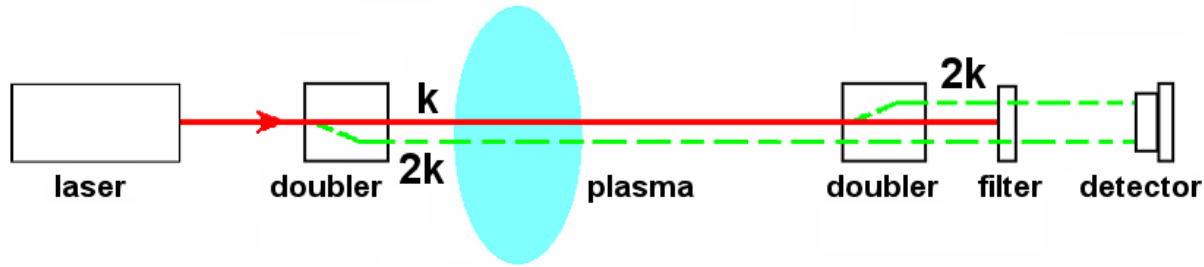


- Используется излучение линии  $C^{5+}$  ( $n = 8 \rightarrow 7$ )  
 $\lambda_0 = 5290.525 \text{ \AA}$
- Измерения  $T_i(R, t)$  и  $V_{tor}(R, t)$ .
- 8 пространственных точек, расположенных со стороны слабого магнитного поля от сепаратриссы до магнитной оси.



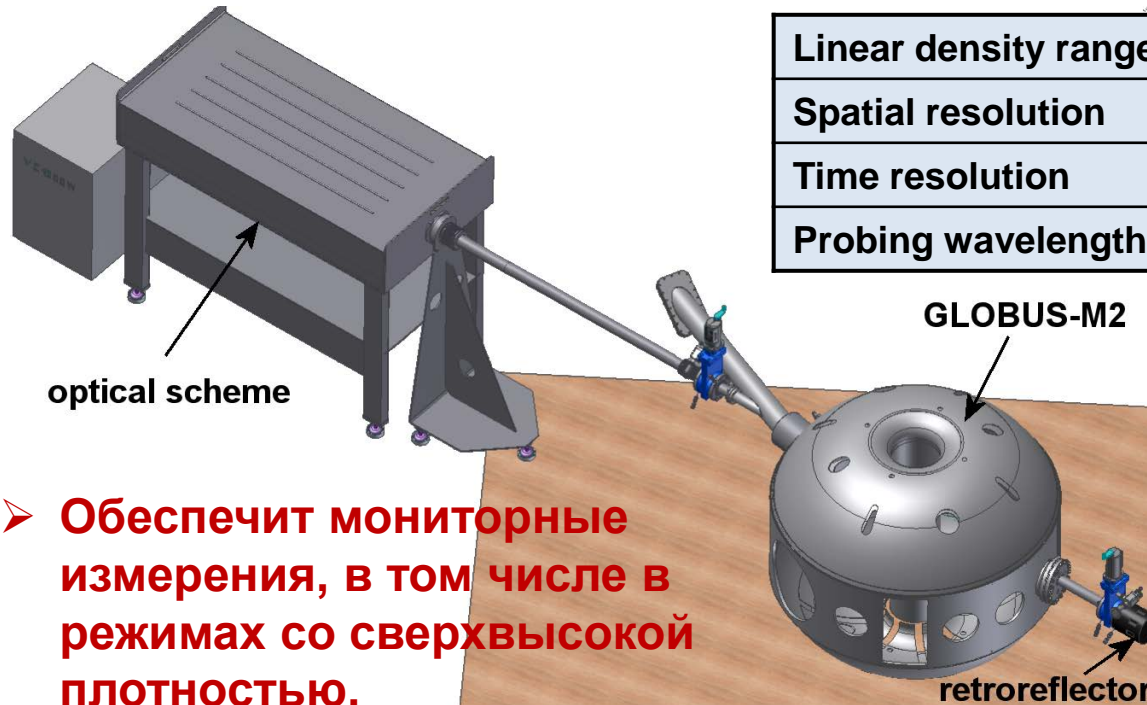
№ хорды	1	2	3	4	5	6	7	8
R, м	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48	0.51	0.53	0.56
угол к магн. пов., град.	6.1	2.2	0.2	-0.5	-0.2	0.6	1.9	3.3

# Дисперсионный ИК интерферометр находится на этапе подготовки к работе



Излучение на обеих длинах волн распространяется по одному пути:

- Снижение чувствительности к вибрациям.



Linear density range	$5 \times 10^{17} - 3 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$
Spatial resolution	2 cm
Time resolution	10 $\mu\text{s}$
Probing wavelength	9.6 / 4.8 $\mu\text{m}$

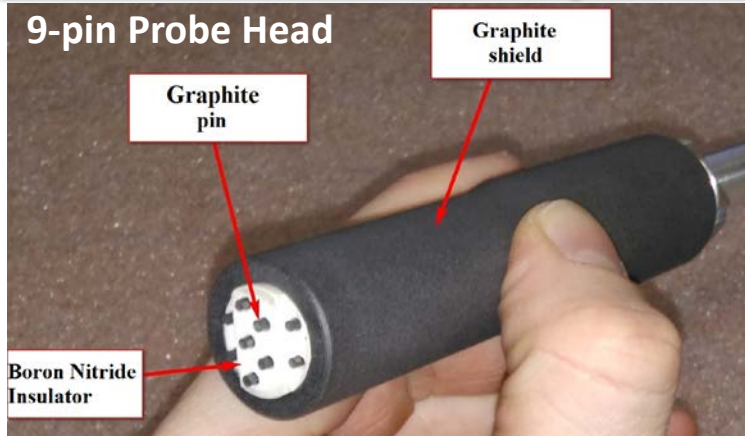
Длины волн 9.6 и 4.8  $\mu\text{m}$ :

- Снижение влияния рефракции по сравнению с СВЧ интерферометром.
- Достаточный фазовый сдвиг по сравнению с интерферометрами видимого диапазона.

- Обеспечит мониторинговые измерения, в том числе в режимах со сверхвысокой плотностью.

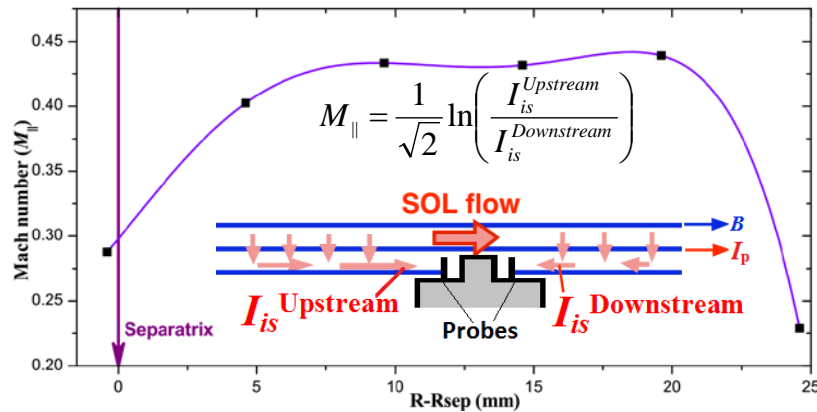
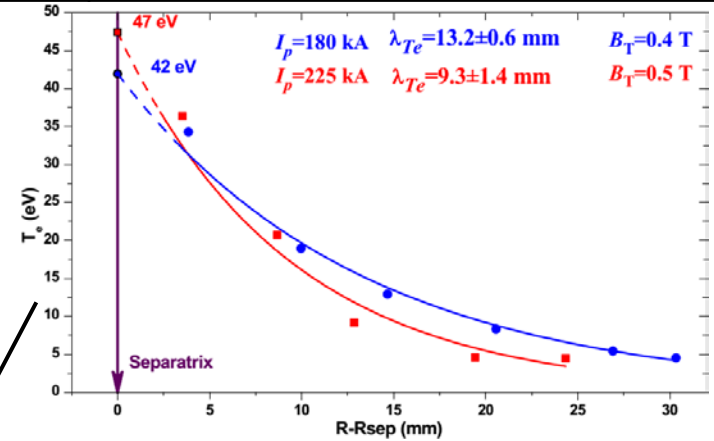
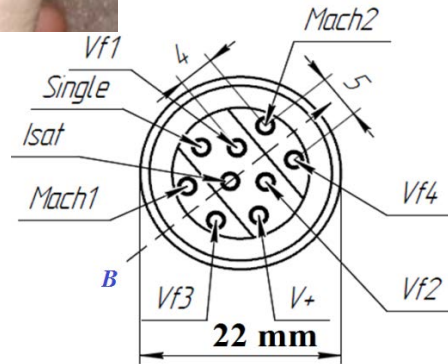


# Подвижный зонд Ленгмюра для определения параметров SOL



Pin	Measured parameters
Single	Electron Temperature ( $T_e$ ), Ion saturation current ( $I_{is}$ ), Floating Potential ( $V_f$ )
{Isat, V+, Vf2} → Triple probe	$T_e, I_{is}, V_f$
Mach1, Mach2	Mach number ( $M_{  }$ )
Vf4, Vf1, Vf3	$V_f$

Подвижный 9-электродный зонд вводится в плазму в экваториальной плоскости токамака со стороны слабого поля.

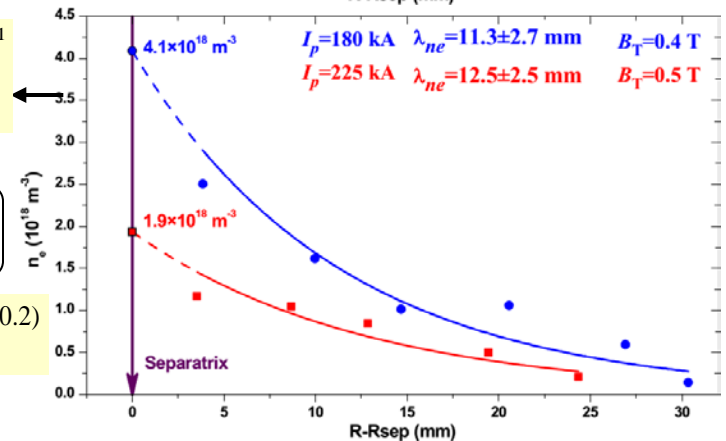


$$\lambda_q = \left( \frac{1}{\lambda_{n_e}} + \frac{3}{2\lambda_{T_e}} \right)^{-1}$$

$$\lambda_q = 4.9 \pm 0.5 \text{ mm}$$

$$\lambda_q = 4.1 \pm 0.5 \text{ mm}$$

$$\lambda_q^{Gloбус-M} \sim I_p^{-(1.3 \pm 0.2)}$$

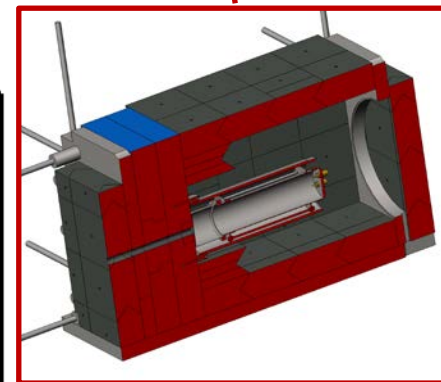


# Нейтронный спектрометр

Установлены два нейтронных спектрометра на основе жидкого сцинтиллятора BC-501A (Saint Gobain Crystals).

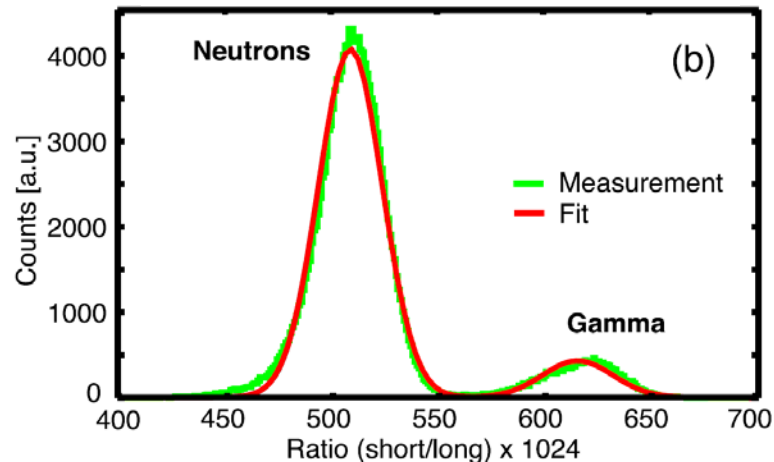


- Для снижения влияния рассеянных нейтронов и гамма-излучения детектор помещен в защитный корпус из полиэтилена и свинца.
- Использование сцинтиллятора BC-501A обеспечивает хорошее n / гамма разделение.



Свинцовая защита (внутри полиэтиленовой)

Figure of merit of the  $\gamma$ -n separation



Scintillator size	$\varnothing 51 \times 51$ mm
Light output (% Anthracene)	78
Density	0.84 g/cm <sup>3</sup>
Ratio H:C atoms	1.212
Decay time (short component)	3.2 ns
Wavelength of maximum emission	425 nm
Signal sampling rate	> 500 MHz
Maximum counting rate (with n/gamma separation)	$\sim 10^6$ 1/s

# Нейтронные счетчики

## 2 пропорциональных счетчика

Счетчик: Гелий -  
18/180 - 8,0/БЦ



Ядерная реакция:  $He^3(n, p)H^3$

Изготовлен коллиматор из полиэтилена и свинца для нейтронных счетчиков  $He^3$

## 2 коронных счетчика

Блок детектирования  
нейтронного излучения  
БДН-20: слева –  
счетчик СНМ-11 и  
полиэтиленовый  
замедлитель, справа –  
детектор в сборке

Ядерная реакция:  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$



Изготовлена защита из полиэтилена для нейтронного счетчика  $B^{10}$



Вид спереди на коллиматор

Вид сверху, внутри защиты



Вид спереди на коллиматор



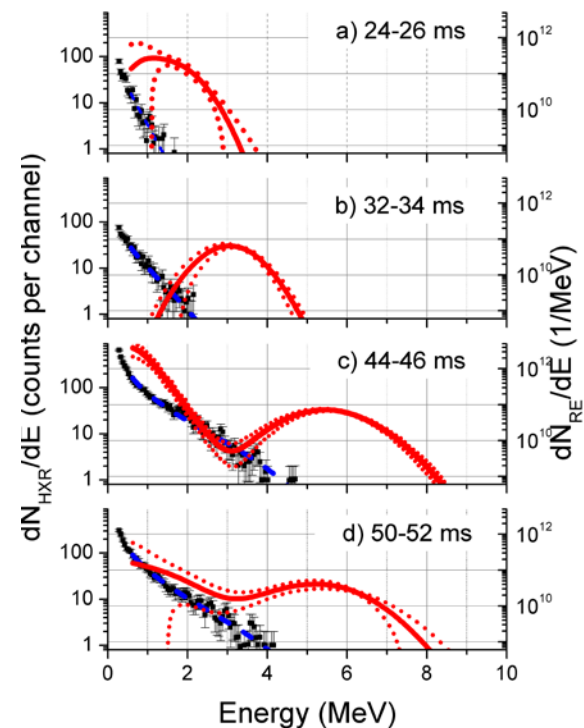
Вид внутри (сняты передние листы защиты)

Два  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  спектрометра установлены для НХР-диагностики убегающих электронов.



- Энергетические распределения убегающих электронов восстанавливаются с помощью кода DeGaSum.

HXR spectra (*black dots, left axes*) and corresponding runaway electron distribution function (*red lines, right axes*).



Crystal dimensions:	Ø38x51 mm
Crystal density	5.08 g/cm <sup>3</sup>
Scintillation decay time	~ 16 ns
Wavelength of maximum emission	– 380 nm
Maximum spectrometric counting rate	~ 10 <sup>7</sup> 1/s
Signal sampling rate	> 500 MHz

[E.M. Khilkevitch, et al., 2013 Tech. Phys. Lett. 39 (1) 63]  
 [A. E. Shevelev, et al., 2016 Nucl. Instr. Methods, A 830 102–108]  
 [A. E. Shevelev, et al., 2018 Nucl. Fusion 58 016034]

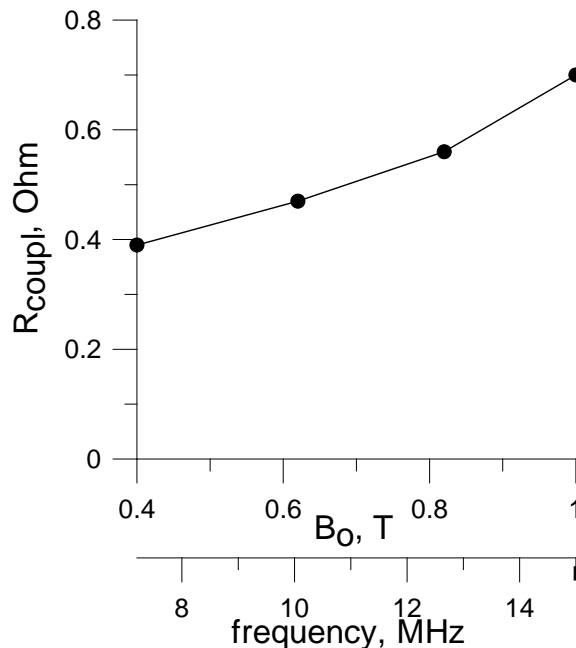
# Задачи и планы

- Отдельные задачи
- Планы

# ICRH на основной гармонике

**Эффективность ИЦ нагрева должна возрастать с увеличением  $B_T$**

- Улучшение ситуации с однократным поглощением из-за уменьшения длины волны
- Улучшение связи антенны с плазмой
- Улучшение удержания быстрых ионов
- Увеличение доли мощности, вкладываемой в ионы



Particle	Fraction of power at 0.4 T	Fraction of power at 1.0 T
$e^-$	0,641	0.46
$p^+$	0,260	0,38
$d^+$	0,099	0,16



[O.N. Shcherbinin, *Tech. Phys. Lett.* **38** (2012) 10]  
 [V.K. Gusev et al., *Nucl. Fusion* **53** (2013) 093013]

- Апробация метода в новых экспериментальных условиях.**
- Испытания новой конструкции двухпетлевой антенны с целью увеличения подводимой к плазме мощности.**

# Трехионный H-D-(<sup>3</sup>He) сценарий ИЦ нагрева плазмы

Проведено теоретическое моделирование сценария ионно-циклотронного нагрева в плазме с тремя сортами ионов применительно к условиям сферического токамака Глобус-М2

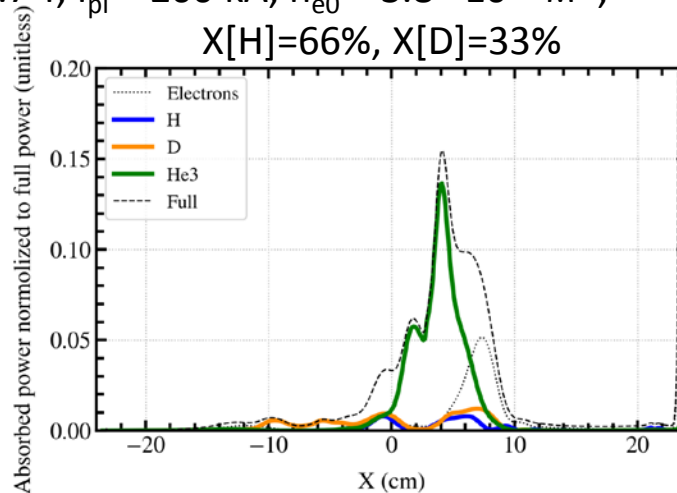
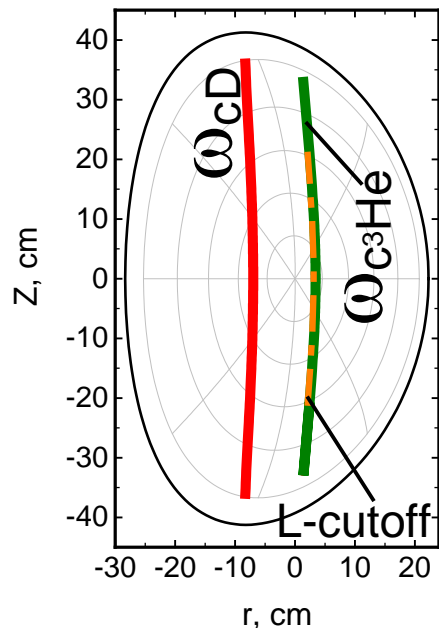
- Для реализации 3х-ионного сценария необходимо подобрать соотношение концентраций H и D таким образом, чтобы совместить положение отсечки БМЗ волны для двухкомпонентной H-D плазмы с положением циклотронного резонанса <sup>3</sup>He.

Расположение циклотронных гармоник и распределение

мощности поглощенной волны в сечении токамака

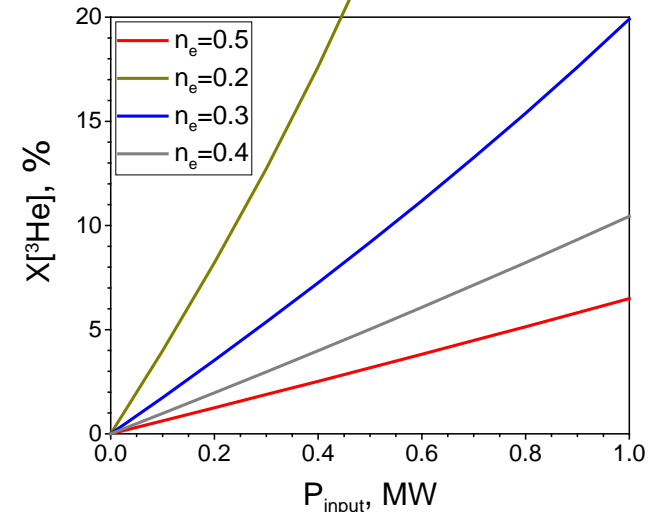
$f = 7$  МГц,  $B_{tor0} = 0.7$  Т,  $I_{pl} = 200$  кА,  $n_{e0} = 3.8 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>,

$X[H]=66\%$ ,  $X[D]=33\%$



e <sup>-</sup>	Ions	He <sup>3</sup>	H	D
40%	60%	41%	6%	13%

Зависимость парциальной концентрации <sup>3</sup>He от мощности накачки, необходимой для того, чтобы доля ускоренных ионов с  $E < 80$  кэВ составляла более 70%.



- Апробация метода в условиях эксперимента на токамаке Глобус-М2.



**Разрабатывается в рамках гранта РФ (соглашение № 21-79-20133 от 24.03.2021 между РФ и АО «НИИЭФА») при использовании базы данных УНУ «Сферический токамак Глобус-М»**

Основные особенности сферического токамака Глобус-3:

- длинный импульс (плато тока плазмы более 2-3 секунд);
- большое тороидальное магнитное поле  $B_{t0}$  (не менее 1.5 Тл);
- мощный нагрев плазмы (5-8 МВт).

Ограничения на параметры Глобус-3 обусловлены существующей инфраструктурой ФТИ:

- мощность системы электропитания не более 125 МВА;
- большой радиус установки  $R$  не более 1 м,
- аспектное отношение не более 1.8.

Анализируется и конструктивно прорабатывается несколько вариантов исполнения электромагнитной системы (ЭМС) установки:

- тёплый вариант ЭМС из медного сплава;
- вариант ЭМС из медного сплава, предварительно охлаждённой до азотных температур;
- варианты сверхпроводниковой ЭМС с использованием НТСП и ВТСП.



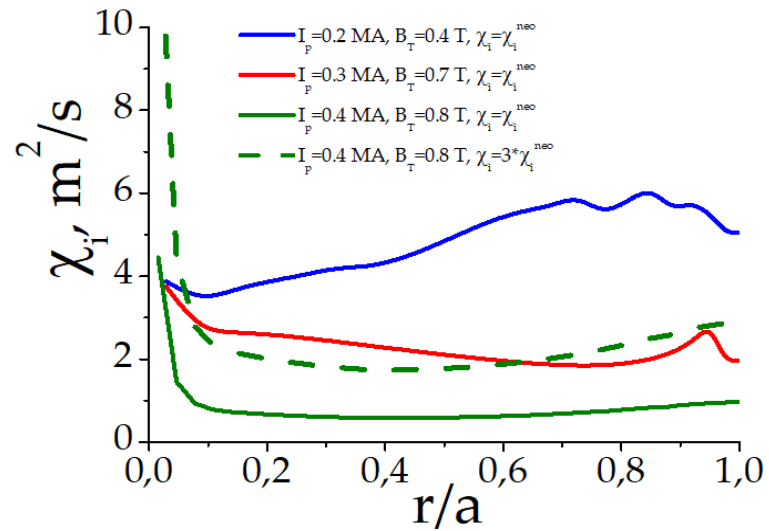
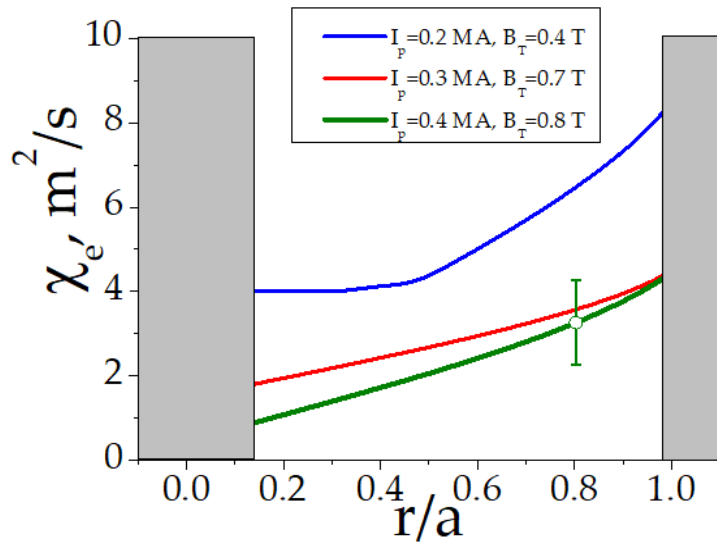
# Планы

- Вывод токамака на режим с максимальными значениями магнитного поля (1 Тл) и тока плазмы (0.5 МА)
- Апробация метода нагрева плазмы в сферическом токамаке с помощью нейтральной инжекции с уровнем мощности выше 1 МВт (п.4.2 мероприятия 1.1.2 РТТН)
- Апробация метода нагрева плазмы в сферическом токамаке с помощью волн ионно-циклотронного диапазона частот (п.6.3 мероприятия 1.1.2 РТТН)
- Апробация метода безындукционной генерации тока в сферическом токамаке с помощью волн ниже-гибридного диапазона частот (п.2.3 мероприятия 1.1.2 РТТН)
- Проработка предложений для следующего поколения компактных сферических токамаков - установка Глобус-3



**Спасибо за внимание!**

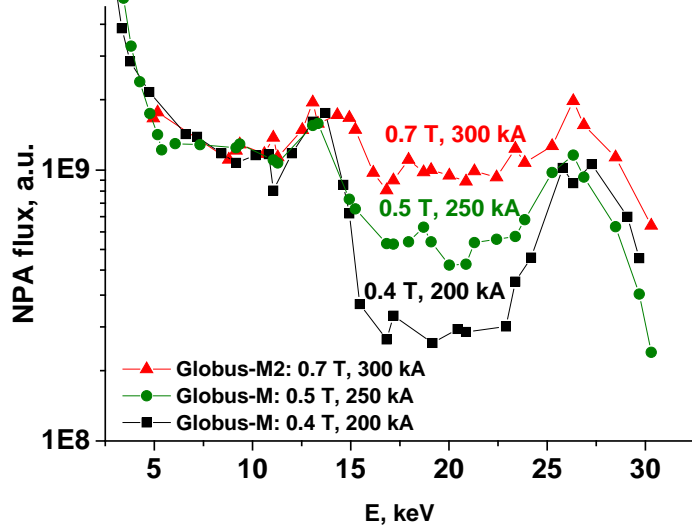
# Термоизоляция электронов и ионов



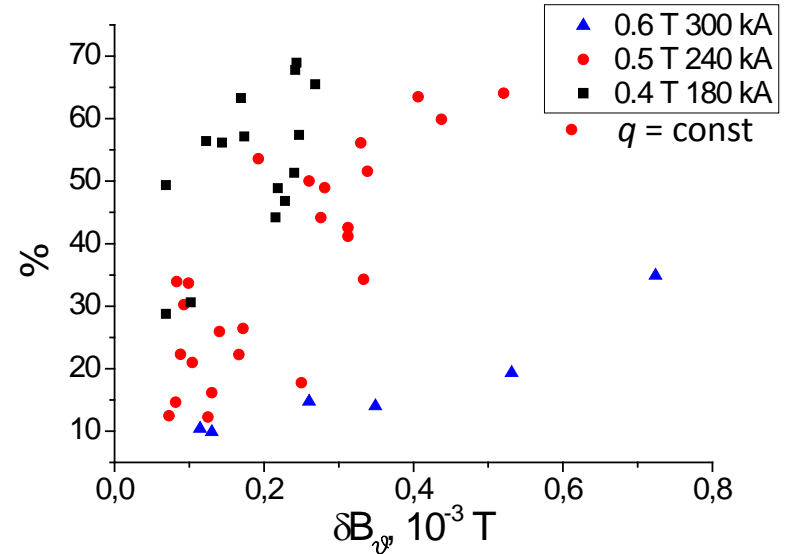
- Анализ энергобаланса плазмы был проведен для режимов с одинаковой плотностью  $n_e = 6.5\text{-}7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  при разных значениях  $B_T$  и  $I_p$  (0.4 Тл/0.2 МА, 0.7 Тл/0.3 МА и 0.8 Тл/0.4 МА) с помощью кода АСТРА.
- Пространственное распределение мощности нагрева плазмы пучком атомов рассчитывалось с помощью кода NUBEAM и верифицировалось орбитальным кодом «3D-fast ion tracking algorithm».
- Моделирование переноса тепла показало, что значения электронной и ионной температуропроводности снижаются в центральной области плазмы в 2-2.5 раза, причем  $\chi_e \approx \chi_i$ .

# Удержание быстрых ионов

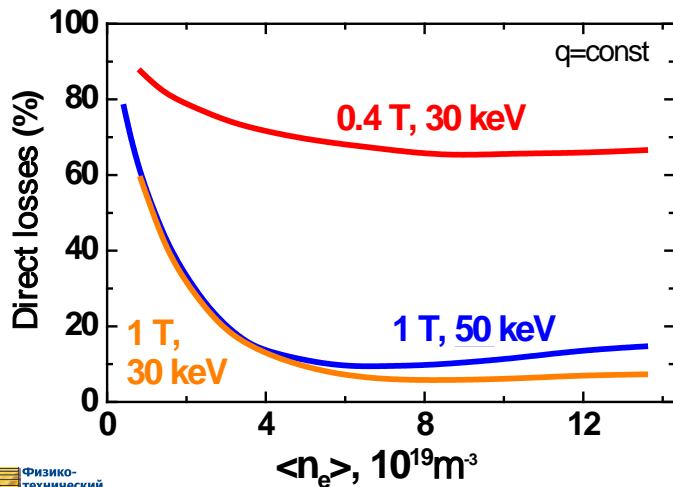
Спектр потока атомов перезарядки, измеренный продольным анализатором



Ослабление потока атомов перезарядки высоких энергий (28.5 кэВ) от интенсивности вспышек ТАЕ (возмущения полоидального магнитного поля)



Моделирование прямых потерь мощности при инжекции нагревного пучка атомов

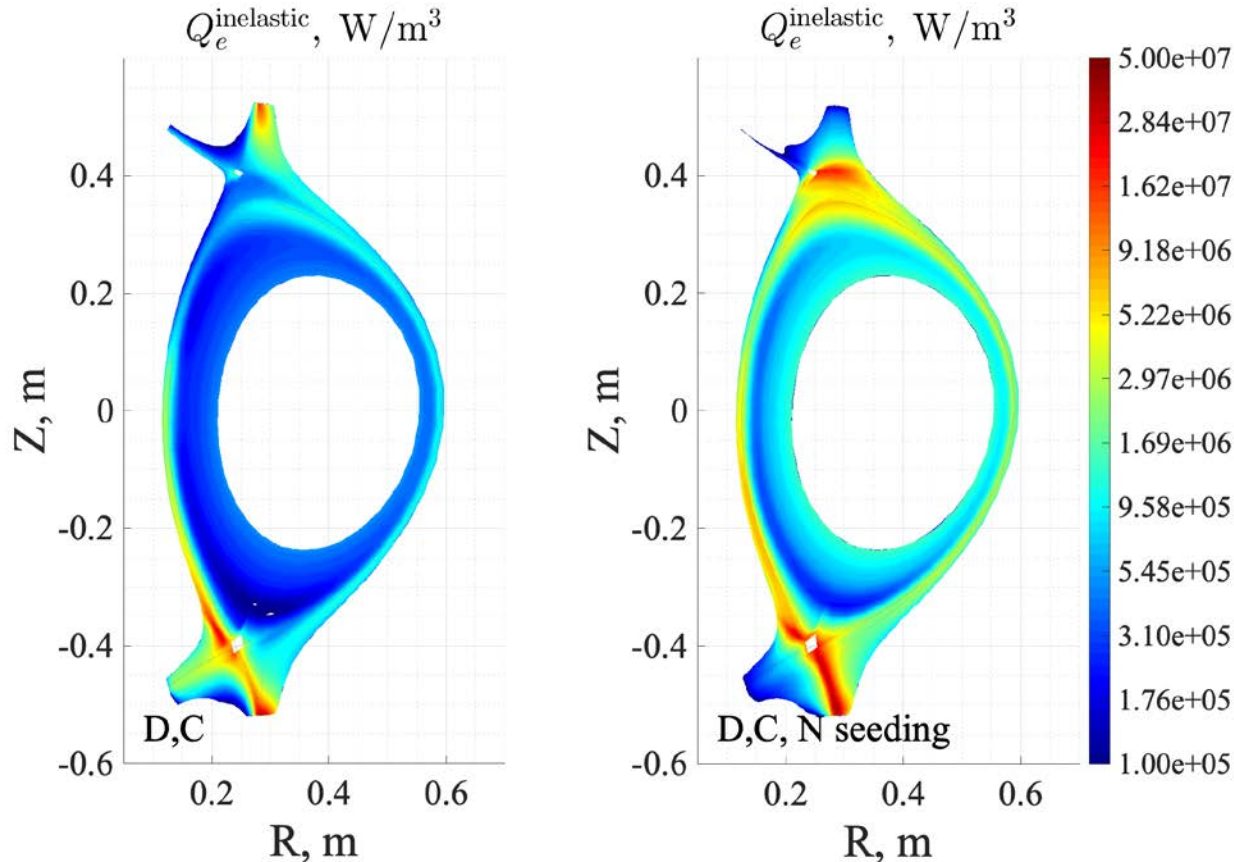


- Удержание быстрых ионов существенно улучшается с увеличением  $I_p$  и  $B_T$ .
- Прямые потери при инжекции 50 кэВ атомарных пучков не превысят 20% в широком диапазоне плотности мишени.
- Потери быстрых ионов, обусловленные вспышками ТАЕ, снижаются с увеличением  $I_p$  и  $B_T$ .

# Эксперименты по уменьшению тепловой нагрузки на диверторные пластины

## Предсказания на основе моделирования кодом SOLPS-ITER

Глобус-M2, разряд 38361,  $I_p=270$  kA,  $B=0.7$  T



Потери на излучение – 1/3 мощности, входящей в расчётную область. Внутри сепаратрисы – 10%

Потери на излучение – 65% мощности, входящей в расчётную область. Внутри сепаратрисы – 25%

**Большая часть потерь на излучение приходится на SOL**



Идеология поиска параметров Глобус-3 включала комплексный учёт инженерных ограничений:

- по суммарной мощности электропитания (125 МВА);
- по допустимому перегреву обмоток (при параметрическом анализе допустимым считался перегрев на 80 °С);
- по запасу потока в соленоиде омического нагрева (длительность плато тока плазмы д.б. больше времени установления профилей параметров плазмы  $\Delta t_{plateau} \geq \tau_{L/R}$ );
- по прочности элементов конструкции.

При построении модели, описывающей физические параметры плазмы, учтены данные, полученные в экспериментах на сферических токамаках Глобус-М, Глобус-М2, NSTX, MAST, ST40, а также физические модели, заложенные в проекты NSTX-U и MAST-U.

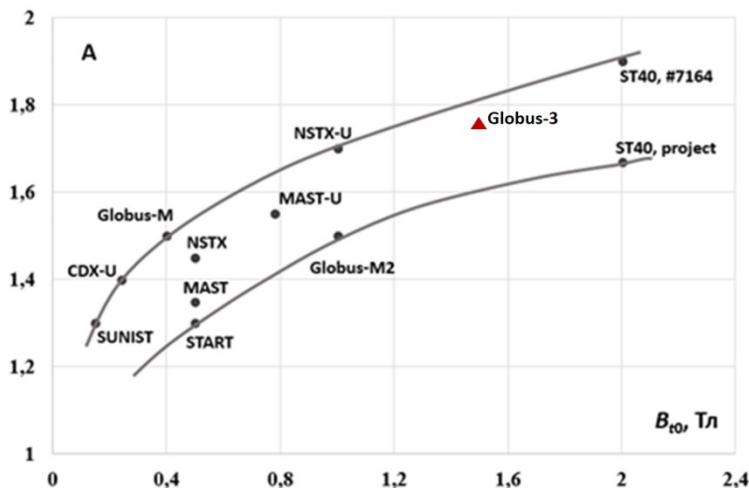
В ходе 2021 – начала 2022 гг. выполнен параметрический анализ для вариантов с тёплой и предварительно захлажденной медью. Предварительные результаты:

- при значении тороидального поля на оси  $B_{t0} \geq 2$  Тл приемлемы только варианты с предварительно захлажденной ЭМС;
- при  $B_{t0} = 3$  Тл условие длительного поддержания плато разряда  $\Delta t_{plateau} \geq \tau_{L/R}$  не выполнить даже при предварительно захлажденной медной ЭМС.

Поэтому при разработке конструкции в качестве базового тороидального поля при тёплой ЭМС принято значение  $B_{t0} = 1.5$  Тл.

По мере увеличения тороидального поля растёт аспектное отношение.

Для Глобус-3:  $A = 1.73$  при  $B_{t0} = 1.5$  Тл



**Параметры для конструкторской проработки варианта с теплой медной обмоткой:**

$$R = 0.76 \text{ м}; a = 0,44 \text{ м}; k_{95} = 1.8;$$

$$B_{t0} = 1,5 \text{ Тл}; I_{p1} = 0,8 \text{ МА};$$

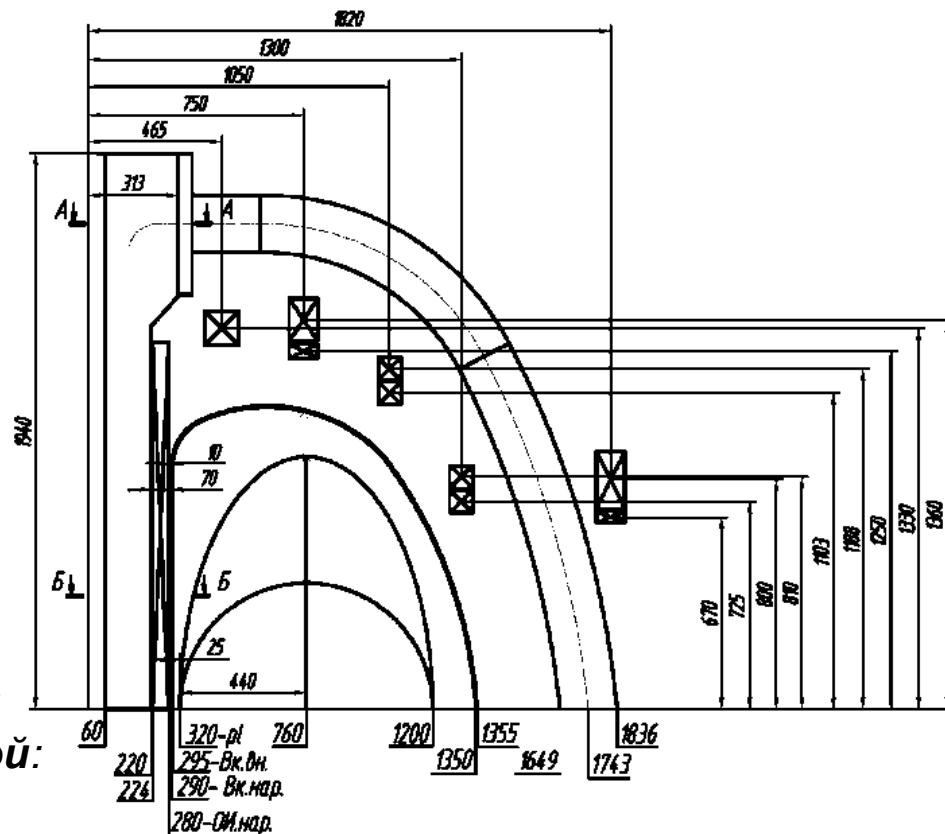
$$\Delta t_{plateau} = 2 \div 3 \text{ с}; \text{ пауза между импульсами } \leq 30 \text{ минут};$$

$$\text{перегрев обмоток за импульс } \leq 40^\circ\text{C};$$

Зазор между плазмой и вакуумной камерой на внутреннем обводе 25 мм;  $N_{TF} = 16$ ;  $\Delta_{ripple} \leq 0.4\%$ .

Глобус-3 вариант "КТМ" 3.4  
16 катушек ОТП

6.05.22



Сечение токамака Глобус-3

# ASTRA code simulations

## Globus-M regimes provides basis for ASTRA code modeling of Globus-M2 parameters

Reference case: Globus-M high density regime with  $\chi_e \approx 8 \text{ m}^2/\text{s}$   
Instruments: ASTRA, NCLASS, NUBEAM codes

Suppose we increase plasma current and toroidal field by factor of 2.5

### Electrons heat transport

ITER scaling [Nucl. Fusion, **47** (2007) 6]

$$\tau_E^{IPB98(y,2)} \sim I_p^{0.93} \cdot B^{0.15} \cdot P_{abs}^{-0.69} \cdot n_e^{0.41} \quad \chi_e^{(Gl-M2)} \approx \frac{1}{2.7} \chi_e^{(Gl-M)} \approx 3 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Spherical tokamak scaling [M.Valovic et al, Nucl. Fusion, **49** (2009) 7]

$$\tau_E^{ST} \sim I_p^{0.59} \cdot B^{1.4} \quad \chi_e^{(Gl-M2)} \approx \frac{1}{6.2} \chi_e^{(Gl-M)} \approx 1.3 \text{ m}^2 / \text{s}$$

### Ions heat transport

$$\chi_i = \chi_i^{NEOCL} + \chi_i^{AN} \quad \chi_i^{AN} \approx D$$

### Particle transport as in Globus-M