

# На пути к освоению энергии управляемого термоядерного синтеза в системах с магнитным удержанием плазмы: новые проекты и идеи

А. Г. Шалашов (ИПФ РАН)

*“Взгляд со стороны”*

<u>РФ</u>	T-10, ФТ-2, Туман, Л-2М, Глобус-М2, ГДЛ, <b>T-15МД</b> , <b>TPT</b> , <b>ТИН</b> , <b>ГДМЛ</b>
<u>США</u>	<b>DIII-D*</b> , HBT-EP, Pegasus, LTX, NSTX, HSX, CTH, <b>C-2W*</b> , <b>SPARC*</b> , <b>ARC*</b> , <b>GA FPP*</b> , <b>C-2/Copernicus*</b> , <b>C-2/Da Vinci*</b> , <b>General Fusion MTF*</b> ...
<u>ЕС</u>	WEST, COMPASS, ISTTOK, <b>ASDEX-Up</b> , FTU, TCV, TJ-K, TJ-II, UST-2, <b>Wendelstein 7-X</b> , <b>DTT</b> , <b>ITER</b> , <b>EU-DEMO</b>
<u>Англия</u>	<b>JET</b> , MAST-Upgrade, ST40*, <b>ST80-HTS*</b> , <b>ST-F1*</b> , <b>STEP</b>
<u>КНР</u>	<b>EAST</b> , J-TEXT, HL-2M, <b>CRAFT</b> , <b>CFETR</b> , <b>BEST</b> , <b>CFQS</b>
<u>Япония</u>	QUEST, <b>JT-60SA</b> , LHD, Heliotron J, GAMMA-10...
<u>Корея</u>	K-STAR, <b>K-DEMO</b>

*За кадром Канада, Индия, Казахстан, Украина, Бразилия, Австралия, Коста Рико...*

Действующие установки (токамаки, стелларатры, прямые ловушки)

Планируемые (строящиеся) токамаки

Планируемые (строящиеся) альтернативные системы

\* Негосударственные компании или существенная доля частных инвесторов

# На пути к освоению энергии управляемого термоядерного синтеза в системах с магнитным удержанием плазмы: новые проекты и идеи

А. Г. Шалашов (ИПФ РАН)

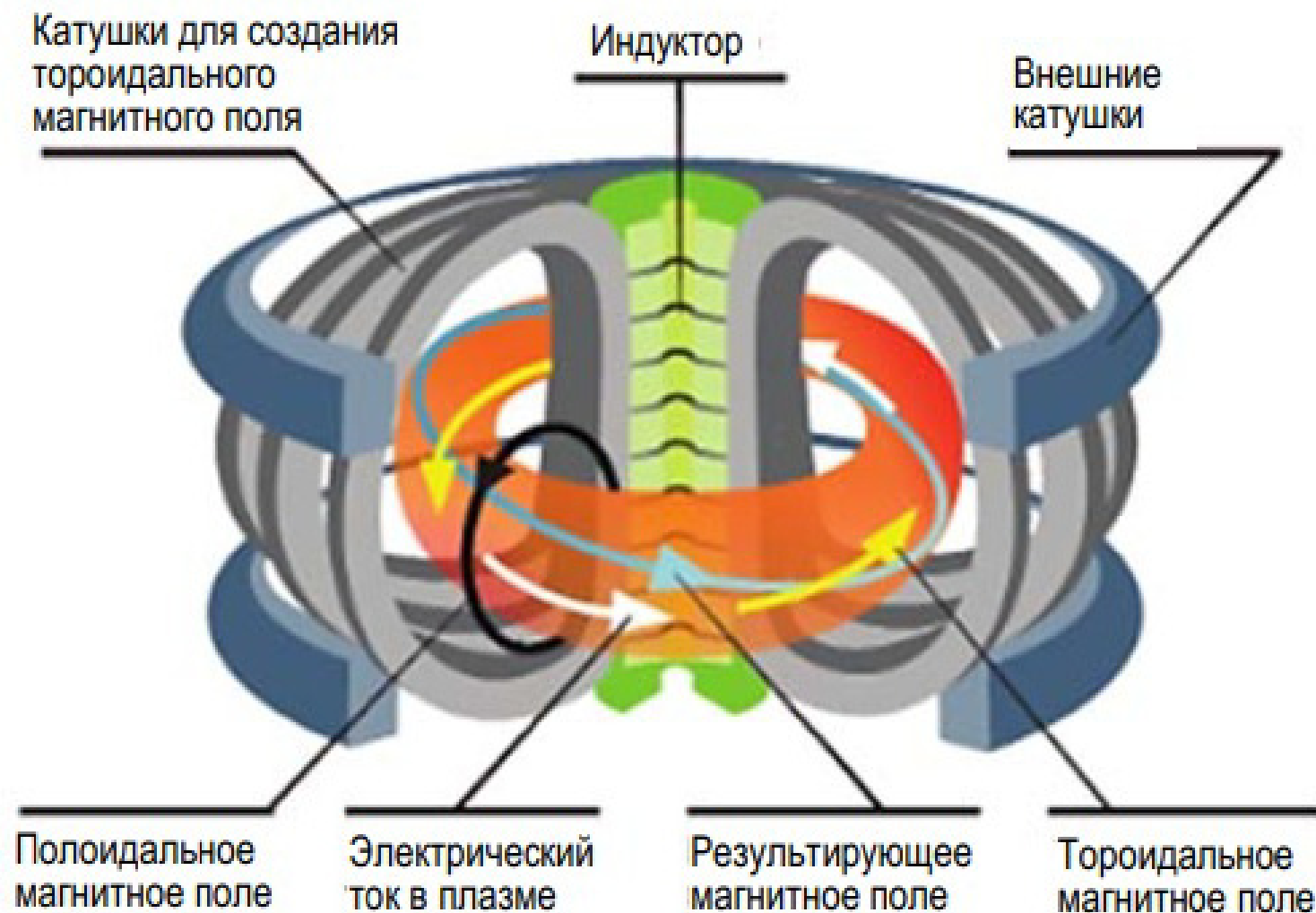
*“Взгляд со стороны”*

## Примерный план

- Как работает токамак
- Термоядерные реакции и критерий Лоусона
- Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем
- Токамаки с сильным магнитным полем
- Сферические токамаки
- Стеллараторы
- Открытые магнитные ловушки
- Резюме: что внушает нам оптимизм / поводы для сомнений

# 1. Как работает токамак

(ТОроидальная МАгнитная Камера, 1957)

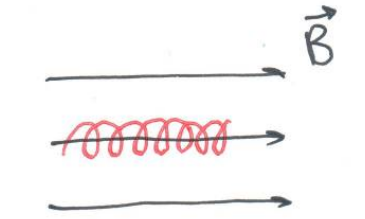


## Принцип работы токамака

# 1. Как работает токамак

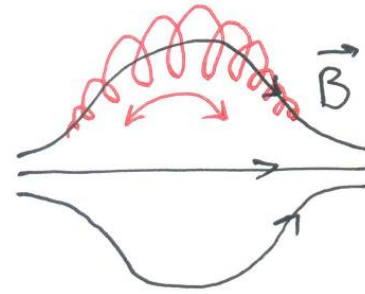
(ТОроидальная МАГнитная Камера, 1957)

①



$$\Phi_{\perp} \approx \nu r_L^2 \sim 1/B^2$$

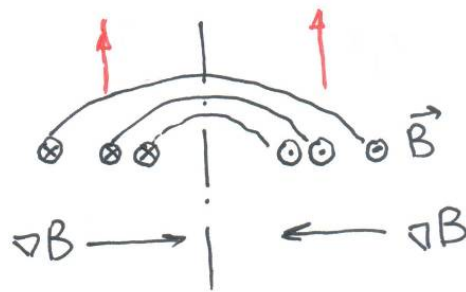
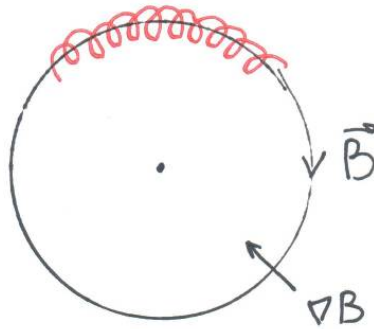
⇒



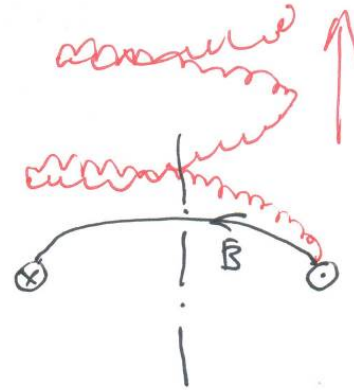
Открытые  
ловушки:

Проблема  
продольных потерь  
частиц и энергии

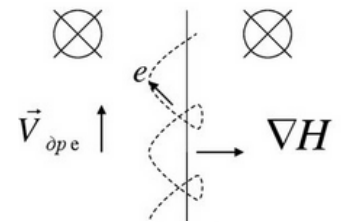
②



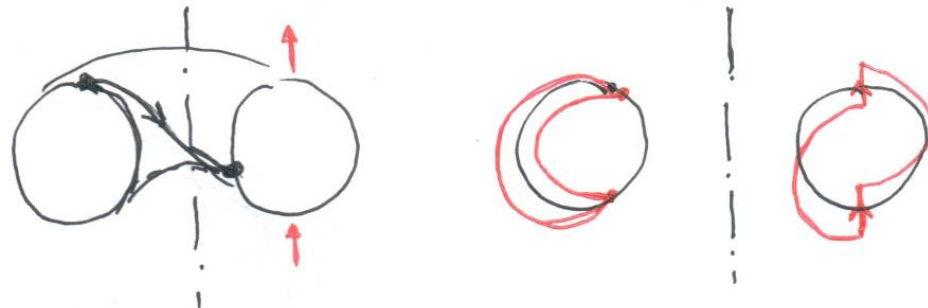
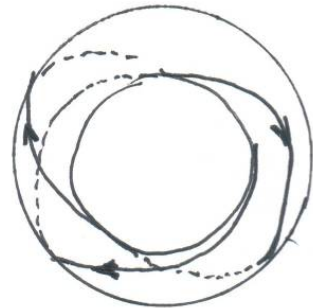
нескомпенсированный дрейф частиц



$$\vec{H}_1 < \vec{H}_2$$



③



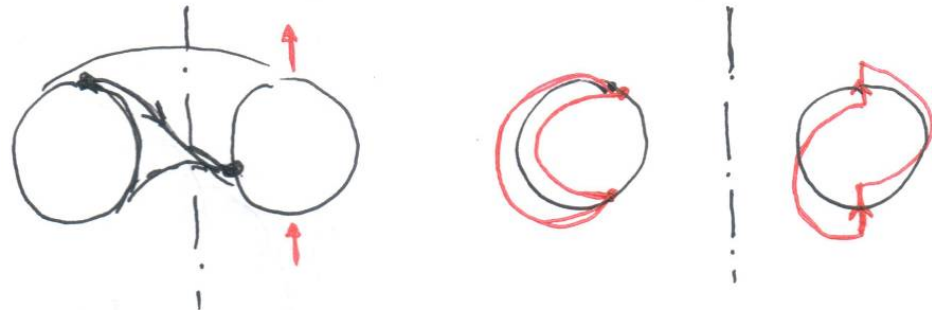
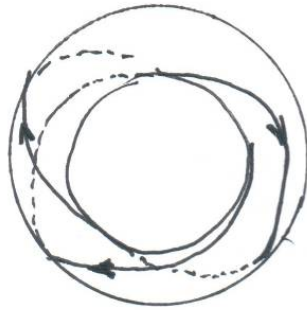
- скомпенсированный дрейф
- коэффициент запаса устойчивости

||

# 1. Как работает токамак

(ТОроидальная МАГнитная Камера, 1957)

3



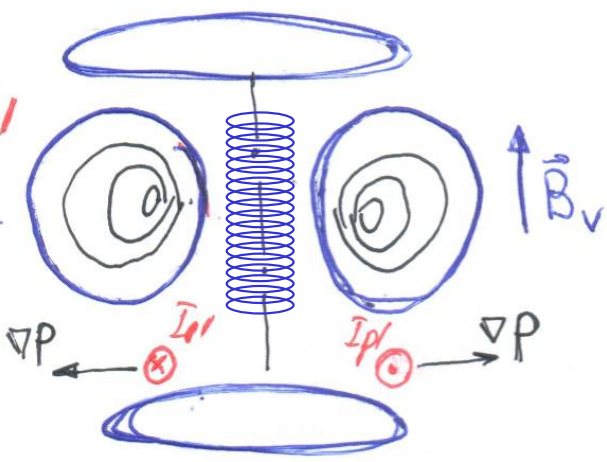
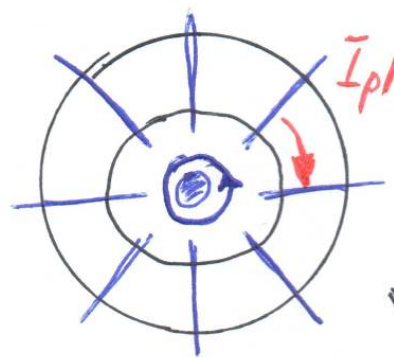
стернатор  
...  
Токамак

- скомпенсированный дрейф
- коэффициент запаса устойчивости

$$q = \frac{\Delta\psi}{\Delta\theta} = \frac{r}{R} \frac{B_{tor}}{B_{pol}} > 1$$

- неклассический перенос  $\mathcal{D} \approx q^2 \mathcal{D}_1$  или больше!

4



⚠  
принципиально  
импульсное  
устройство

$$I_{pl} \sim dI_{cc} / dt$$

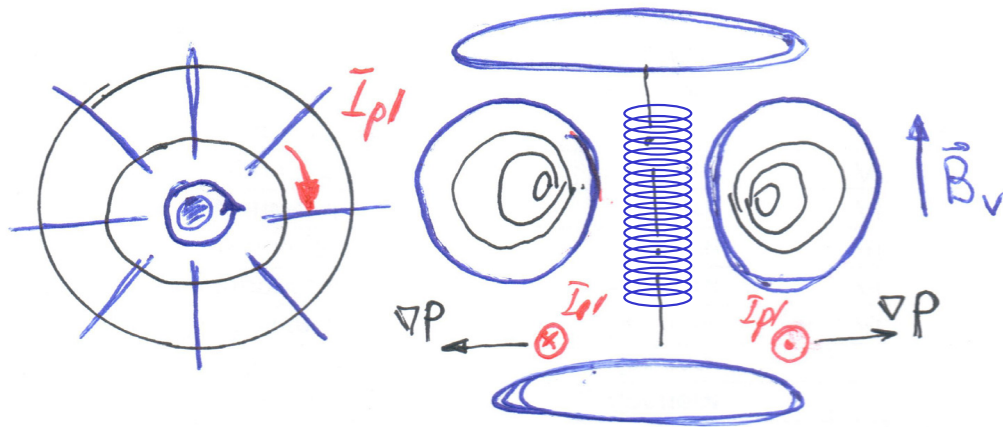
⚠ "Проклятие"

$$\mathcal{D} \approx \nu z_{turb}^2 \sim \frac{1}{B}$$

- тор. поле - катушки
- полиг. поле - индукционный ток
- вертикальное поле - катушки

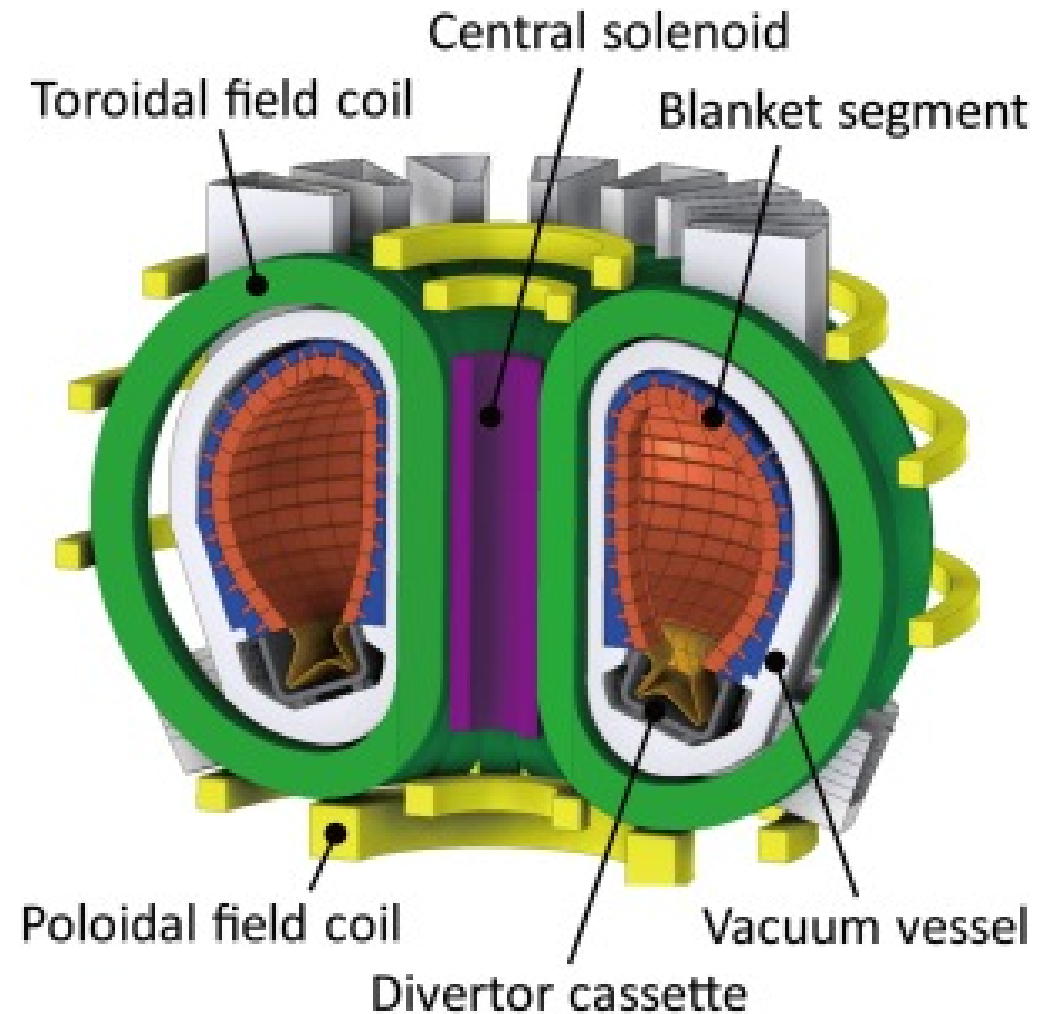
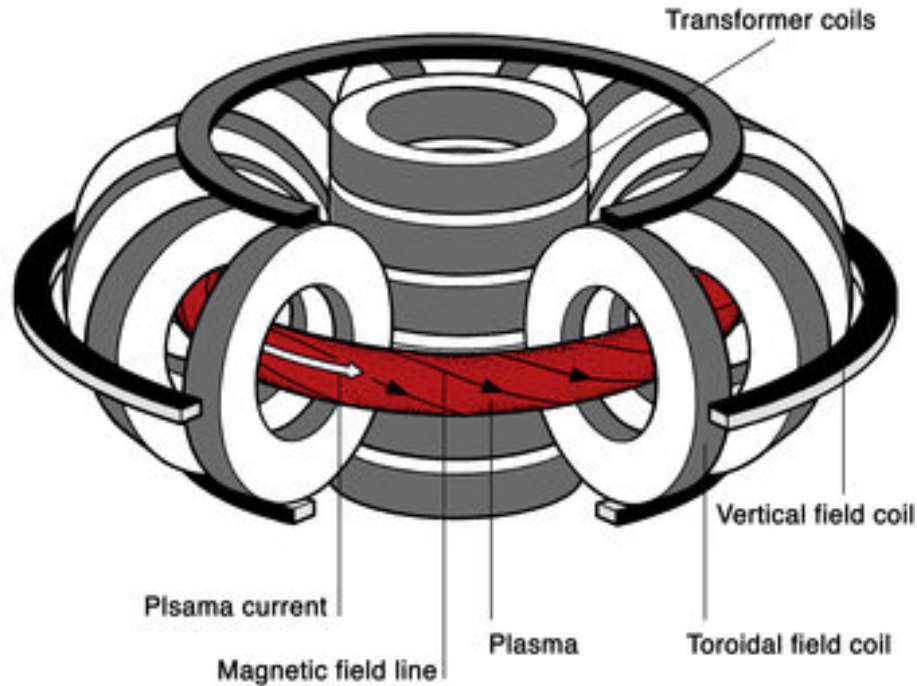
# 1. Как работает токамак

Токамак



«Усовершенствованный»  
(advanced) токамак

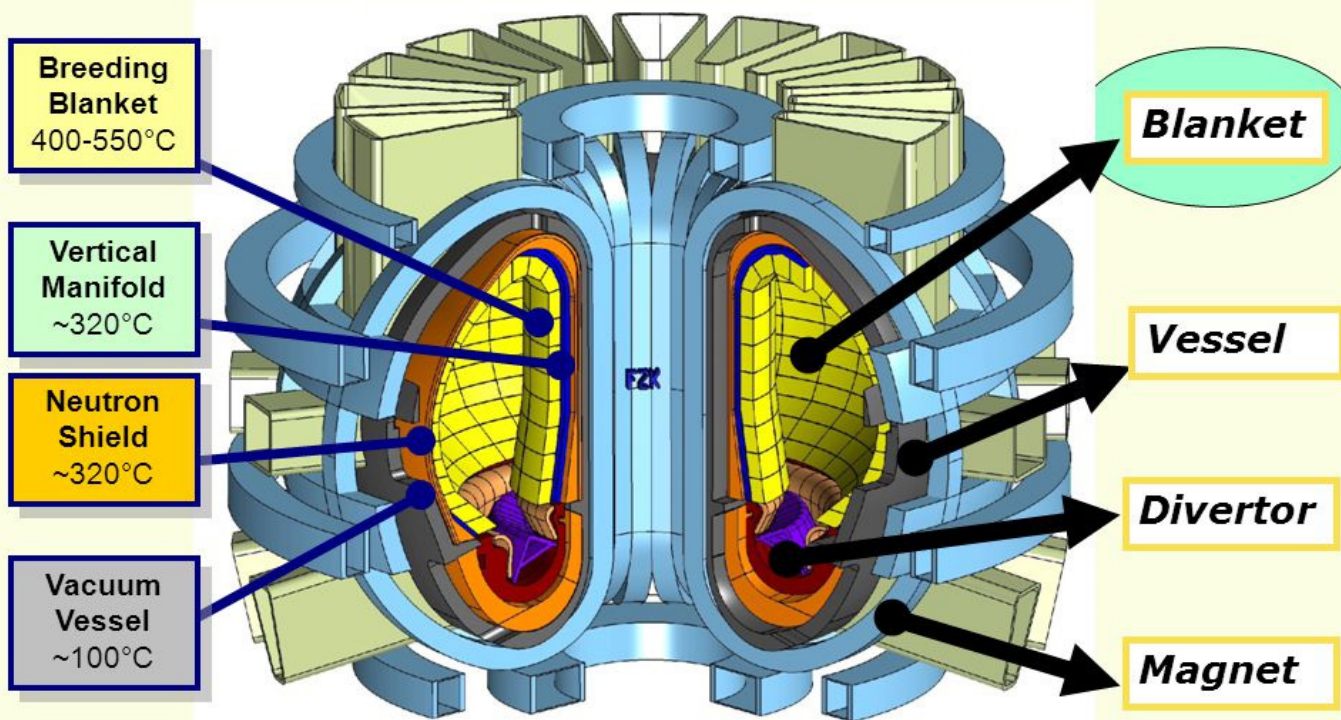
«Классический» токамак



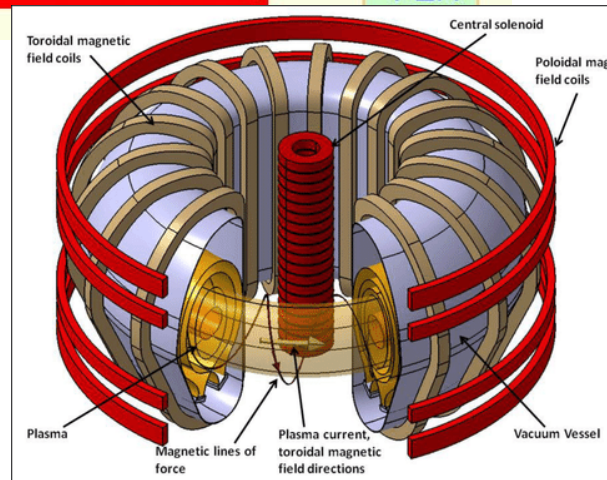
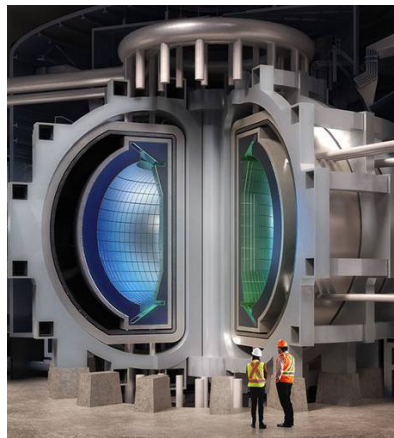
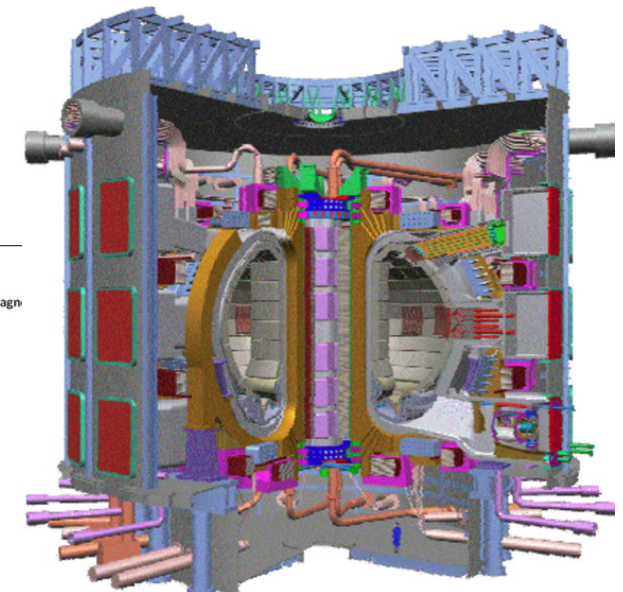
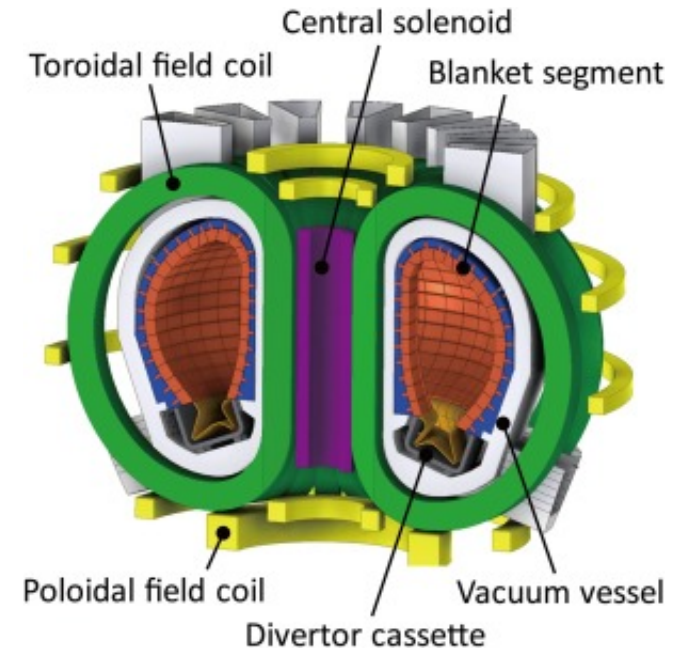
# 1. Как работает токамак

(advanced tokamaks)

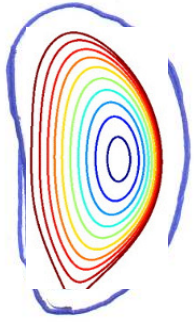
## DEMO Fusion Reactor Core



DEMO = Demonstration Fusion Reactor Plant



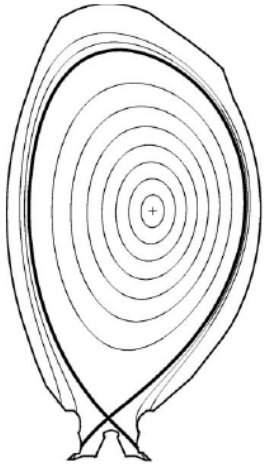
5



Переход от "O" к "D"

- механические напряжения, конструкция
- MHD стабильность плазмы
- совместимости с дивертором

6



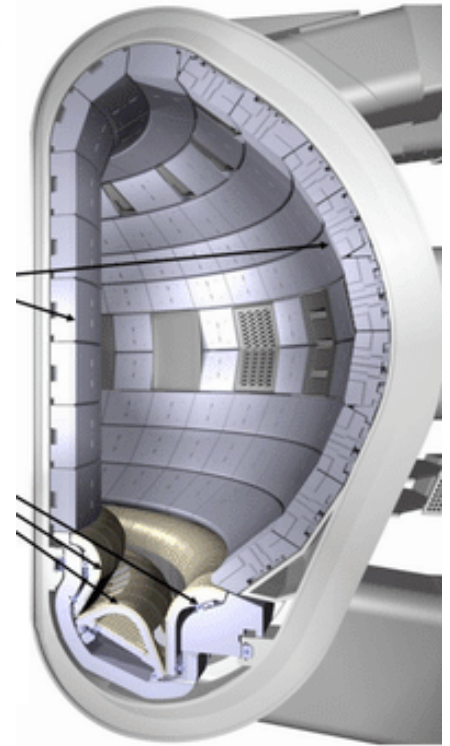
Полоидальный дивертор

- защита от потока примесей в плазму
- управляемый поток из плазмы (отходы T/Я реакции)
- защита от пыли

7

Дополнительный нагрев и генерация тока

- Атомарные пучки (NBI)
- ВЧ волны - ИЦР
- СВЧ волны - ЭЦР, НГ/геликоны



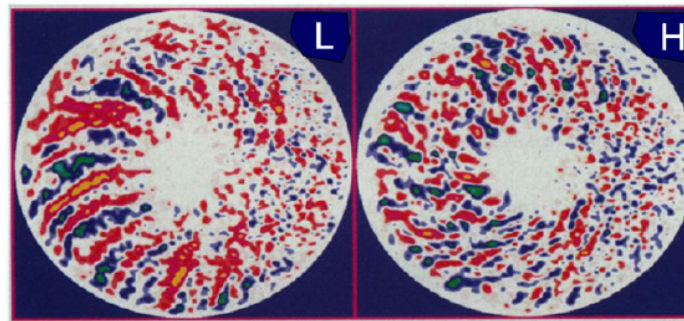


# 1. Как работает токамак

## (H-mode)

8) Дополнительный нагрев плазмы приводит к стабилизации МДГ-турбулентности плазмы (1982, ASDEX, high-confinement mode)

- Универсальное для тороидальной плазмы явление. (самоорганизация в условиях взаимодействия турбулентности на разных масштабах)
- Физика понята в только общих чертах но это не мешает устойчиво воспроизводить H-моду на самых разных установках
- Существует порог по мощности нагрева, появляются новые волны (ELM, GAM) и макро-потоки плазмы
- Время удержания увеличивается в  $H \approx 2$  раза  $\rightarrow$  цена реактора уменьшается в  $H^{1.3} \approx 2.5$  раза



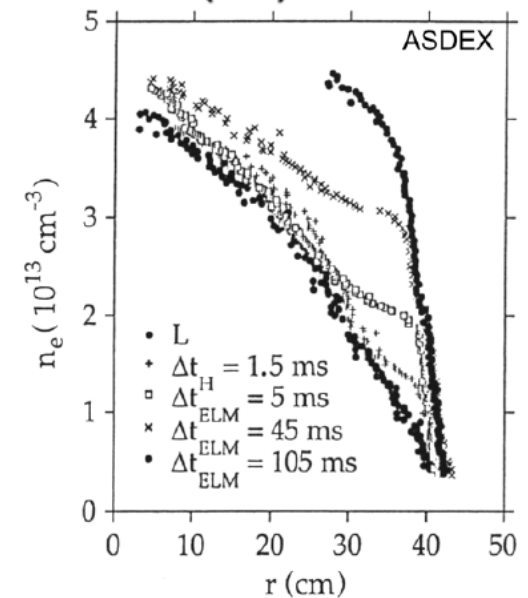
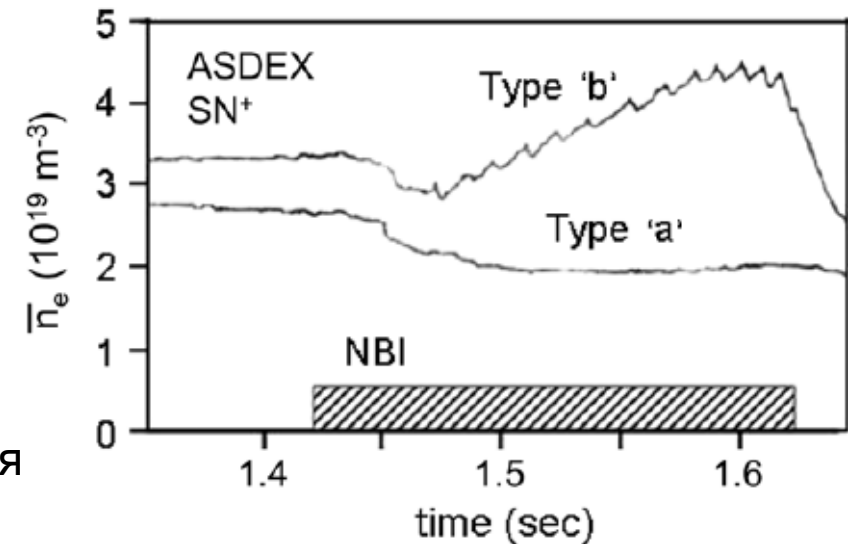
IOP PUBLISHING  
Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007) B1–B33

PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION  
doi:10.1088/0741-3335/49/12B/S01

### A quarter-century of H-mode studies

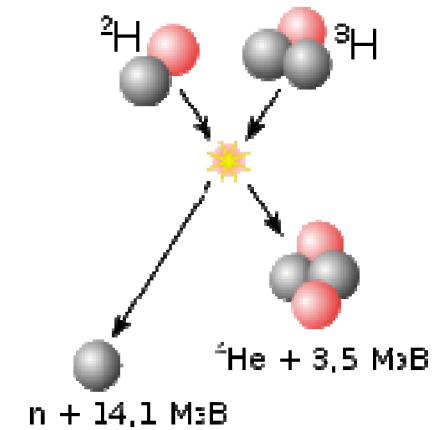
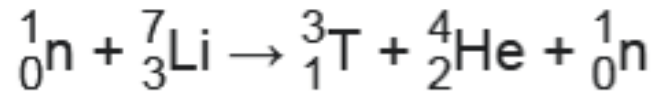
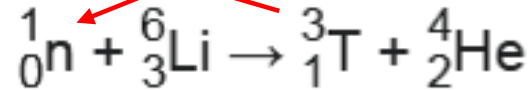
F Wagner  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Teilinstitut Greifswald, EURATOM Association,  
D-17489 Greifswald, Germany  
E-mail: fritz.wagner@ipp.mpg.de

Received 6 July 2007  
Published 14 November 2007  
Online at stacks.iop.org/PPCF/49/B1

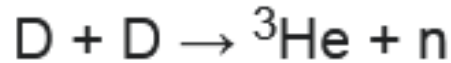
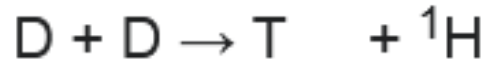


## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона

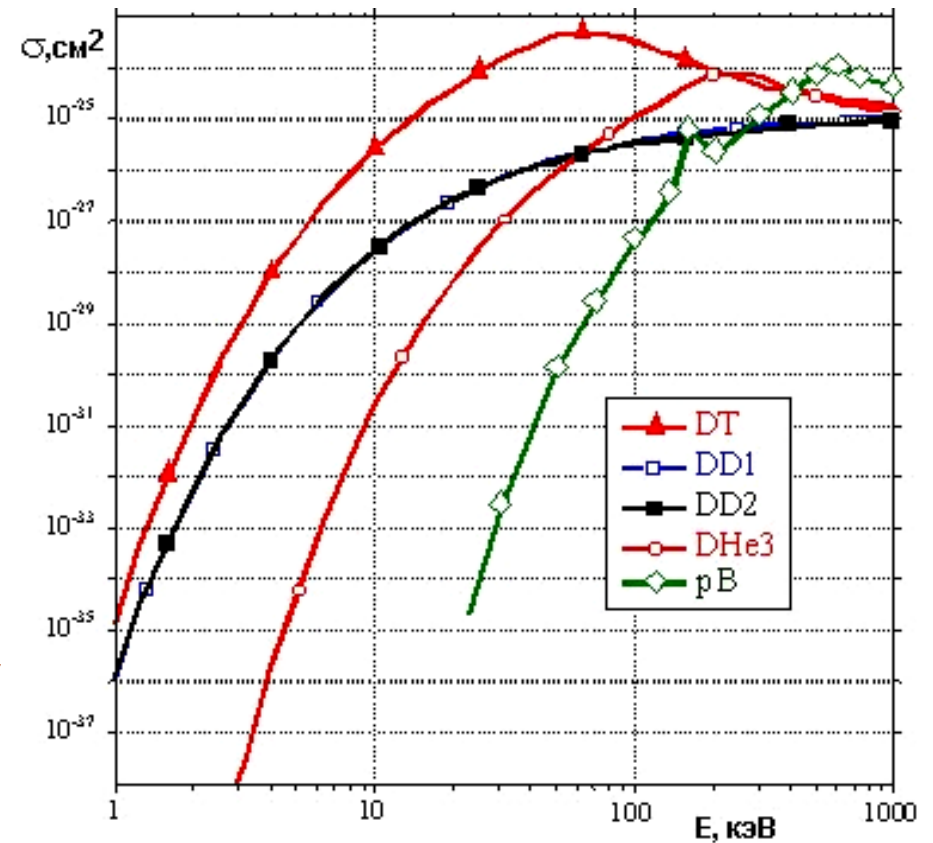
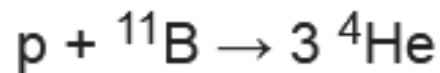
- Дейтерий-тритиумный цикл



- Побочные реакции



- Самая перспективная безнейтронная реакция



## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона (1955)

- Выход т/я реакции  $Q = P_{fus} / P_{ext}$  (scientific gain)

$$Q = 1 \quad \text{положительный выход (breakeven)}$$

$$Q = \infty \quad \text{зажигание (ignition)}$$

- Баланс энергии  $\frac{dW}{dt} = \eta_{ext} P_{ext} + \eta_{fus} P_{fus} - \frac{W}{\tau}$  в стационарном реакторе

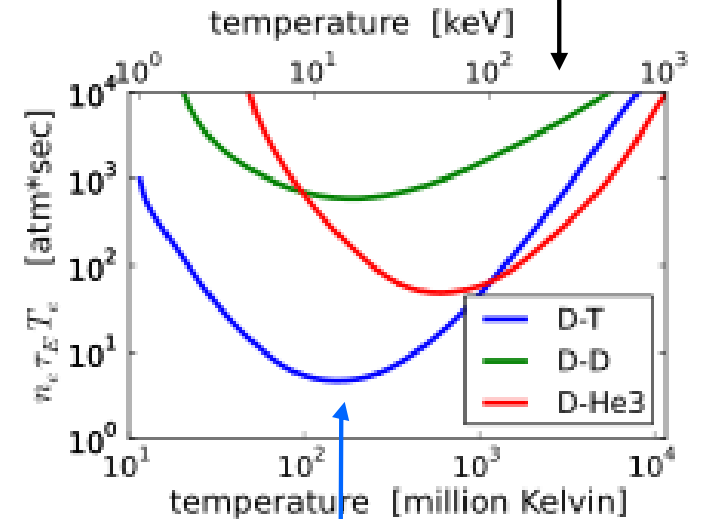
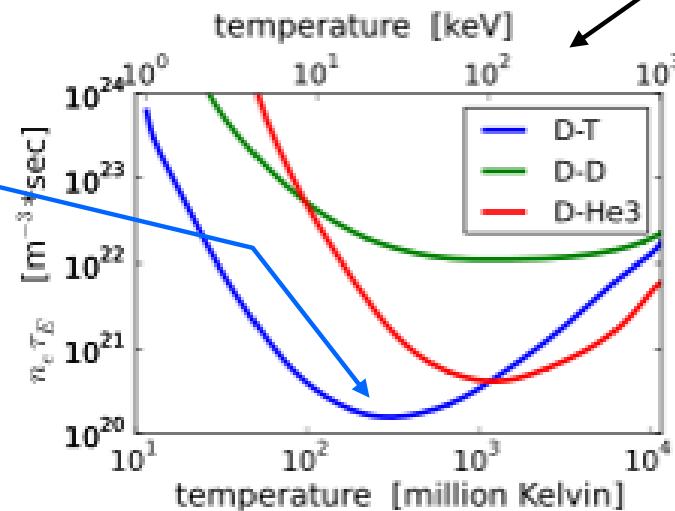
$$0 = (\eta_{ext} / Q + \eta_{fus}) \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_{fus} - \frac{3nT}{\tau} \Rightarrow Q(n\tau, T) \text{ или } Q(nT\tau, T)$$

$$n\tau > 1.5 \cdot 10^{20} \text{ s/m}^3$$

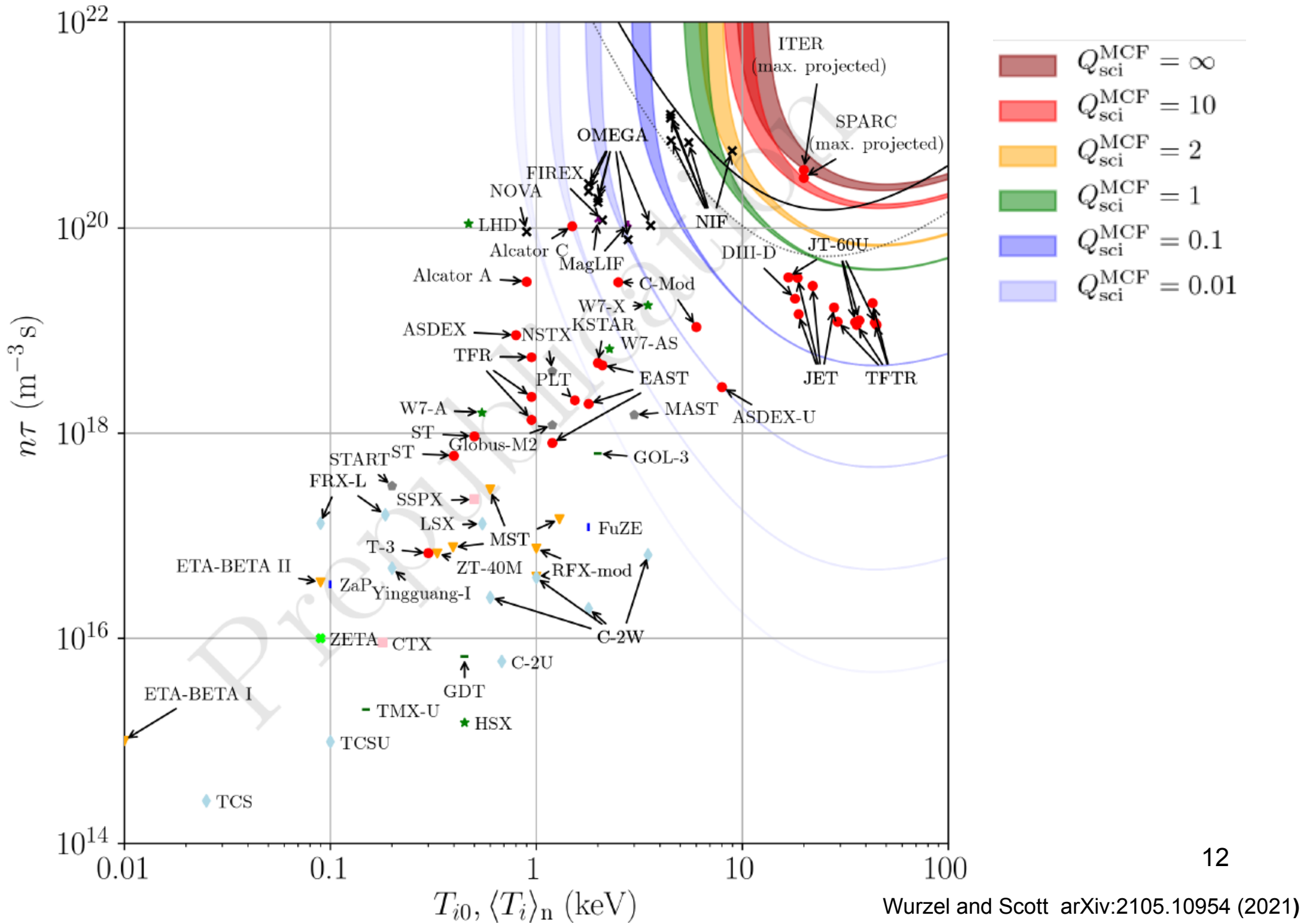
$$T \approx 26 \text{ keV}$$

$$nT\tau > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV s/m}^3$$

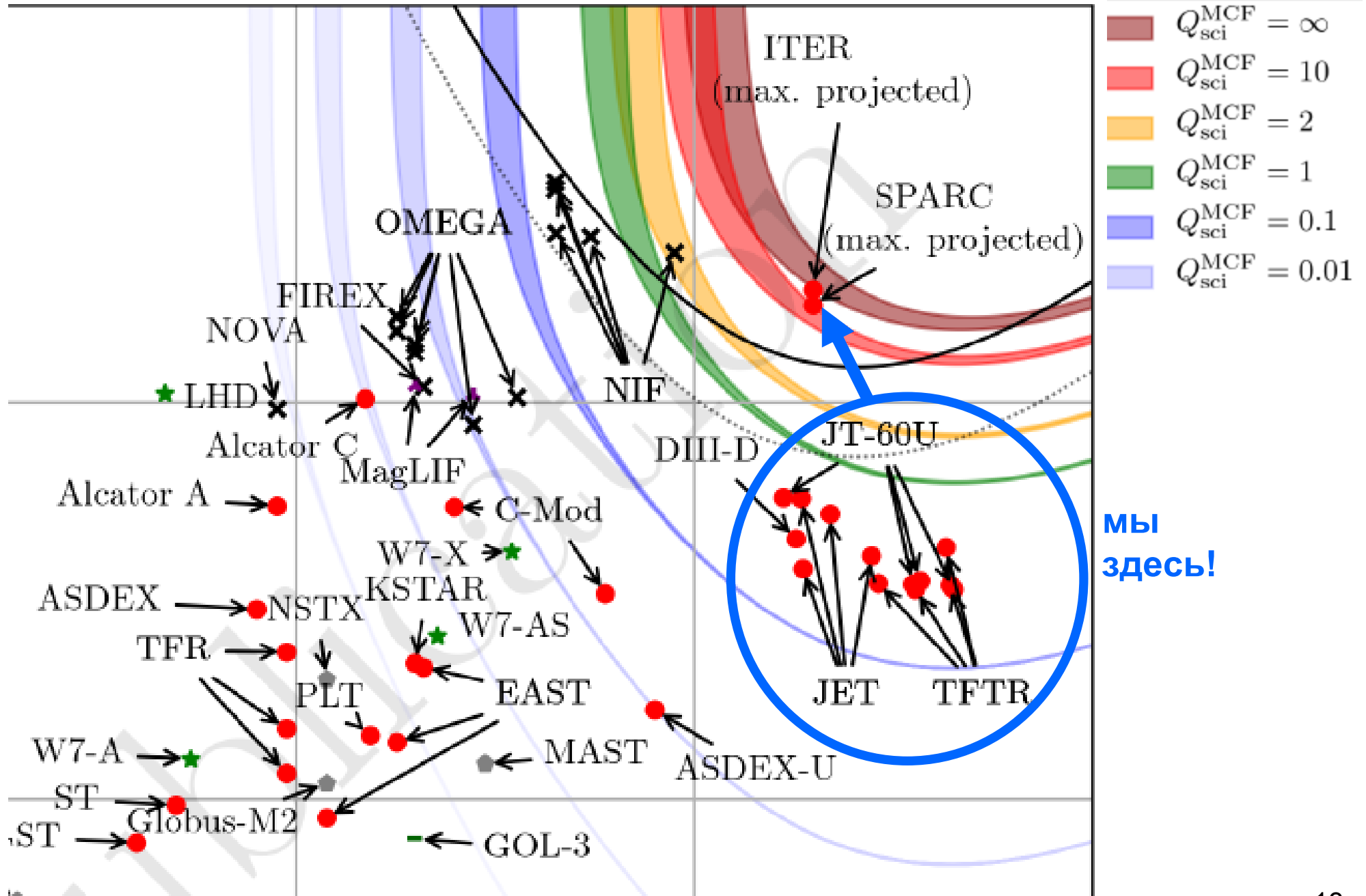
$$T \approx 14 \text{ keV}$$



## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона (2021)



## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона (2021)



## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона

$$nT\tau > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV s / m}^3$$

$$T \approx 14 \text{ keV}$$

### Рекорды

1997	Fusion energy gain $Q$	0.69	JET
	Fusion power $P_{fus}$	16 MW	JET
2013	Lawson criterion $nT\tau$ (tokamak)	$1.53 \times 10^{21} \text{ eV}\cdot\text{s/m}^3$	JT-60
2016	Plasma pressure $nT$	2.05 atm	Alcator C-Mod
2018	Lawson criterion $nT\tau$ (stellarator)	$6 \times 10^{22} \text{ eV}\cdot\text{s/m}^3$	Wendelstein 7-X
	Confinement time $\tau$	0.2 s	Wendelstein 7-X
2021	Temperature $\times$ time $T\tau$ (tokamak)	$3 \times 10^4 \text{ eV}\cdot\text{s}$	K-STAR (30 s)
2022		$1.2 \times 10^5 \text{ eV}\cdot\text{s}$	EAST (17 min)
2022	Tokamak fusion energy	59 MJ	JET
2022	Lawson criterion $nT\tau$ (ST)	$6 \times 10^{21} \text{ eV}\cdot\text{s/m}^3$	ST-40 ???

## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона

### Что определяет размер (стоимость) реактора?

- ITER  $H_{98,y2}$  database  $\tau_E = 0.0562 H_{98,y2} I_p^{0.93} B_t^{0.15} n_{e,19}^{0.41} P_{\text{loss}}^{-0.69} R_0^{1.97} \kappa_a^{0.78} \epsilon^{0.58} M^{0.19}$
- $n$  и  $T$  дополнительно связаны условиями устойчивости и L-H перехода при заданной  $P_{\text{ext}}$

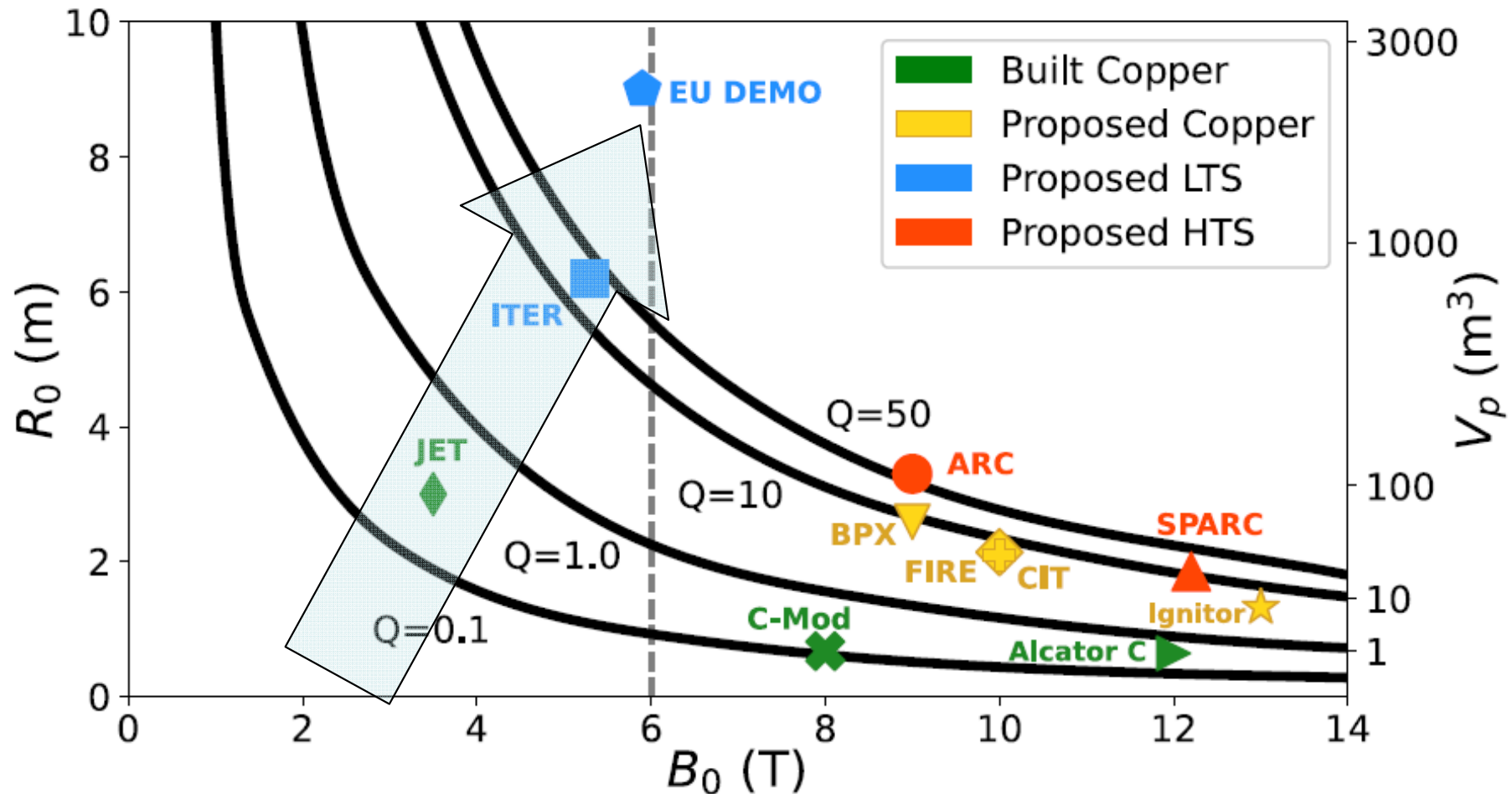


FIGURE 1. Fusion gain  $Q$  plotted against toroidal field on axis  $B_0$  and major radius  $R_0$ . Gain  $Q$  is calculated with the empirical scaling methods presented in § 4, keeping  $\epsilon = 0.31$ ,  $\kappa_a = 1.75$ ,  $\delta_{\text{sep}} = 0.54$ ,  $q^* = 3.05$ , impurity content and  $H_{98,y2} = 1$  constant, and limiting operation to below  $0.9n_G$ . In order to compare these calculated contours with specific design points, other

### 3. Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем

#### ITER      International Thermonuclear Experimental Reactor Международный термоядерный экспериментальный реактор

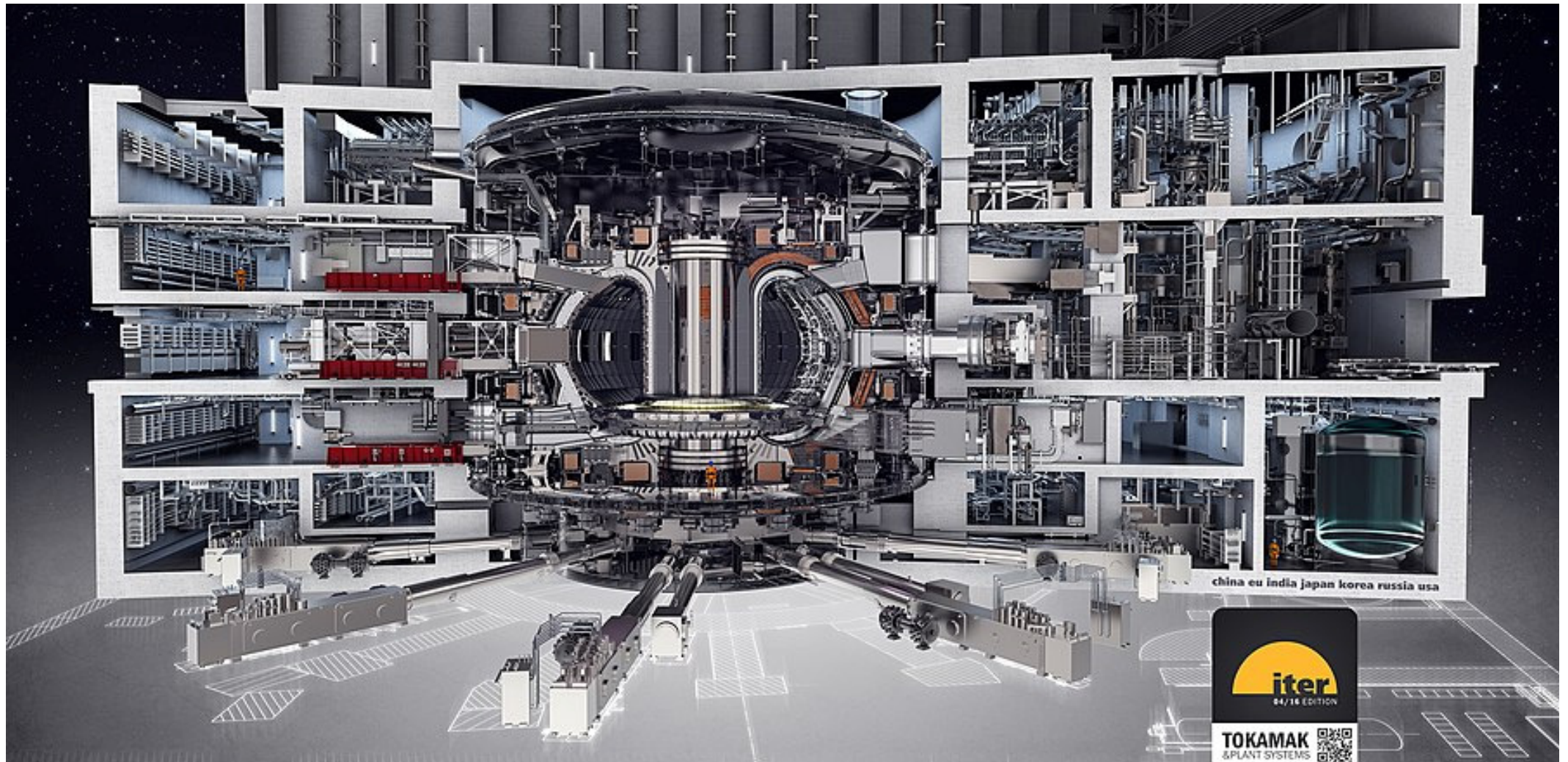
1988-2001	концепция, инженерный проект
2005	выбрано место: Кадараш, Франция
2007-2019	подготовка площадки и строительство инфраструктуры
2020	28 июля началась сборка реактора из компонентов
2025	первая плазма
2035	начало D-T экспериментов

- Основная цель:  $Q > 1$  в течении 1000 сек и  $Q = 10$  без рекуперации энергии
- Проект вобрал в себя все лучшее, что было на 2001 г.
- Часть технологий не существовала в 2001 г., но сейчас существуют!
- **Магнитная система использует лучшие доступные в 2001 г. НТСП Nb<sub>2</sub>Sn и NbTi – именно это ограничило магнитное поле (13 Т в катушках и 5.2 Т в центре камеры) и определило размеры и стоимость машины**



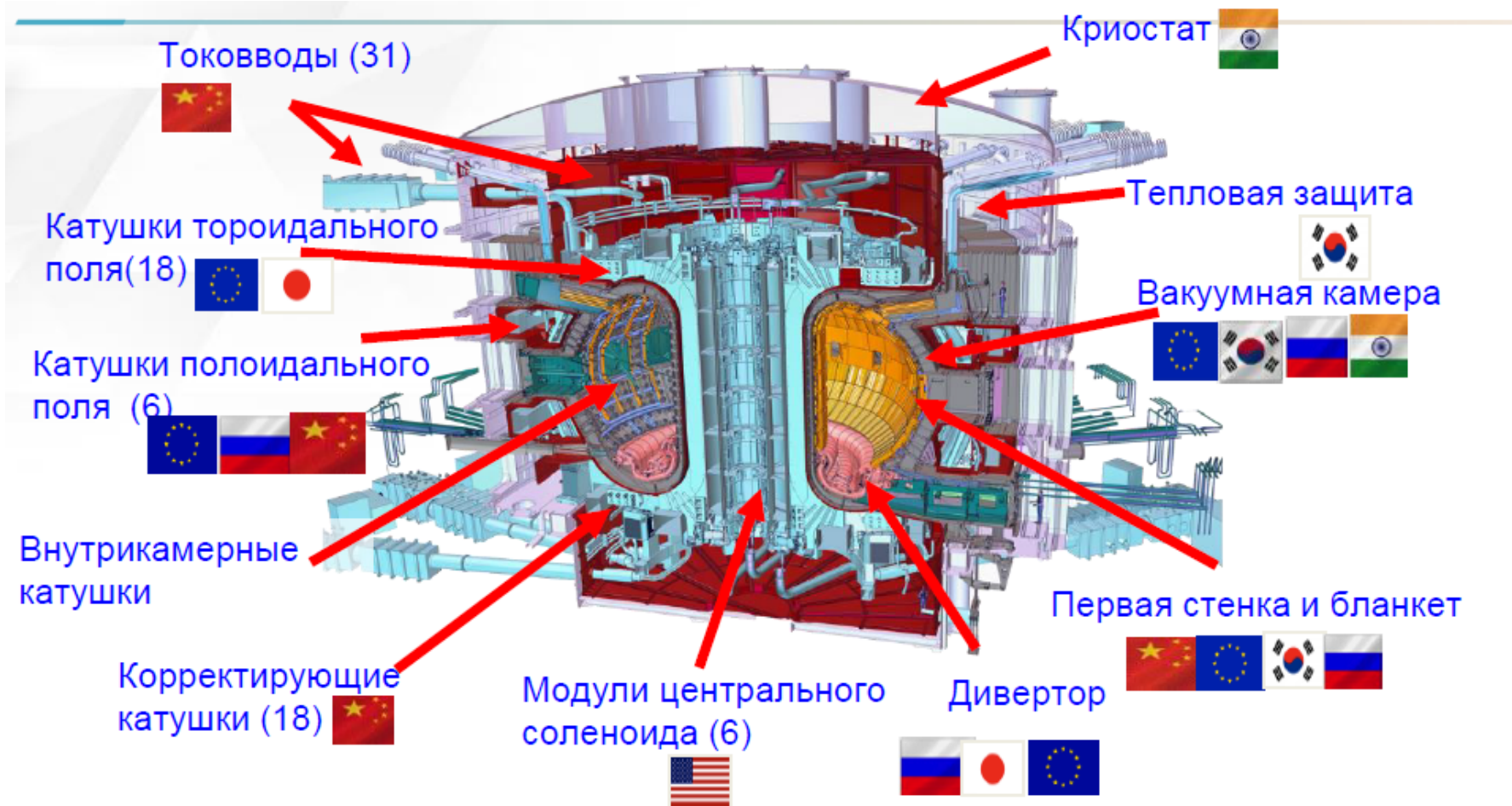
### 3. Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем

	$P_{ext}$ , МВт	$P_{fus}$ , МВт	Q	$R_0$ , м	a, м	$B_0$ , Т	запуск, год
JET	24	16	0.67	3	1.25	3.45	1983
<b>ITER</b>	<b>50</b>	<b>500</b>	<b>10</b>	<b>6.2</b>	<b>2.0</b>	<b>5.3</b>	<b>2025</b>
EU-DEMO	80	2000	25	>7	>2	6 Т	2051



### 3. Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем

**ITER International Thermonuclear Experimental Reactor**  
**Международный термоядерный экспериментальный реактор**



РФ получит право на безвозмездные лицензии на все технологии, созданные в проекте ИТЭР, для использования в рамках национальной программы УТС

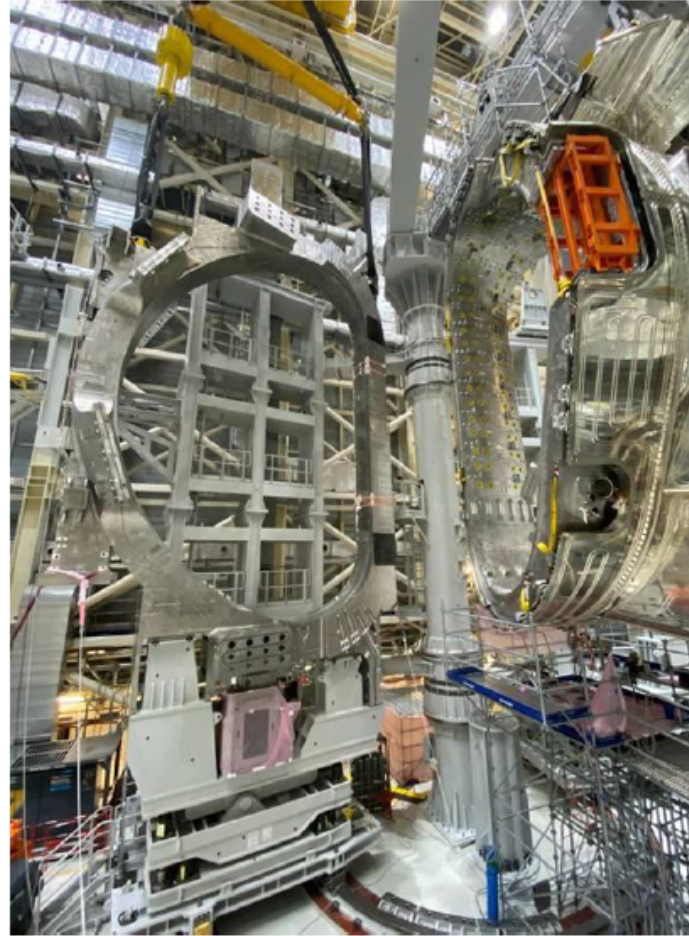
### 3. Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем

iter

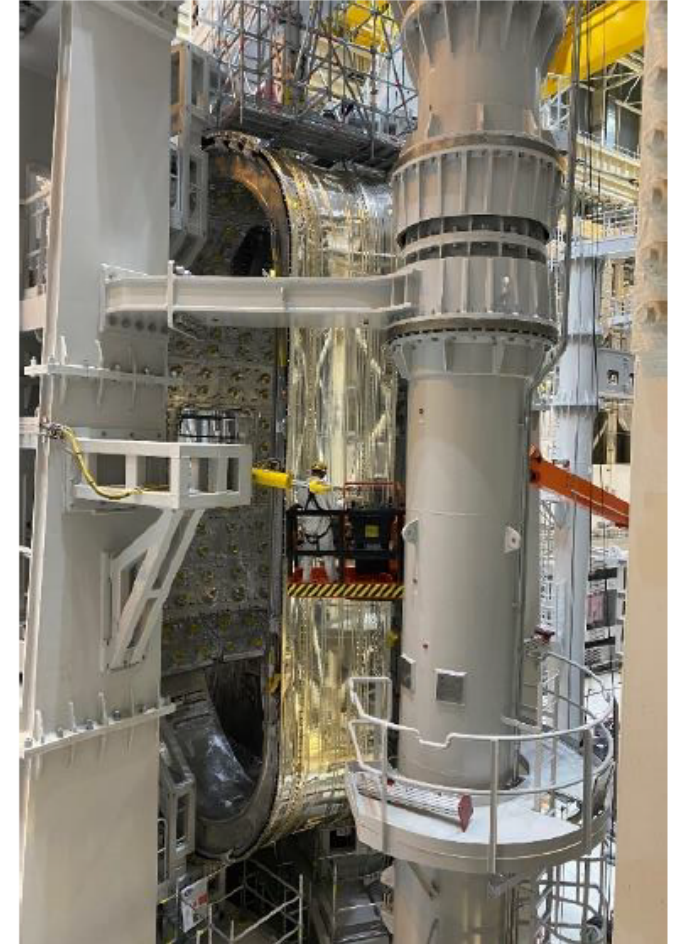
#### Progress of Machine Delivery, Installation and Assembly



Central Column installation in the Pit



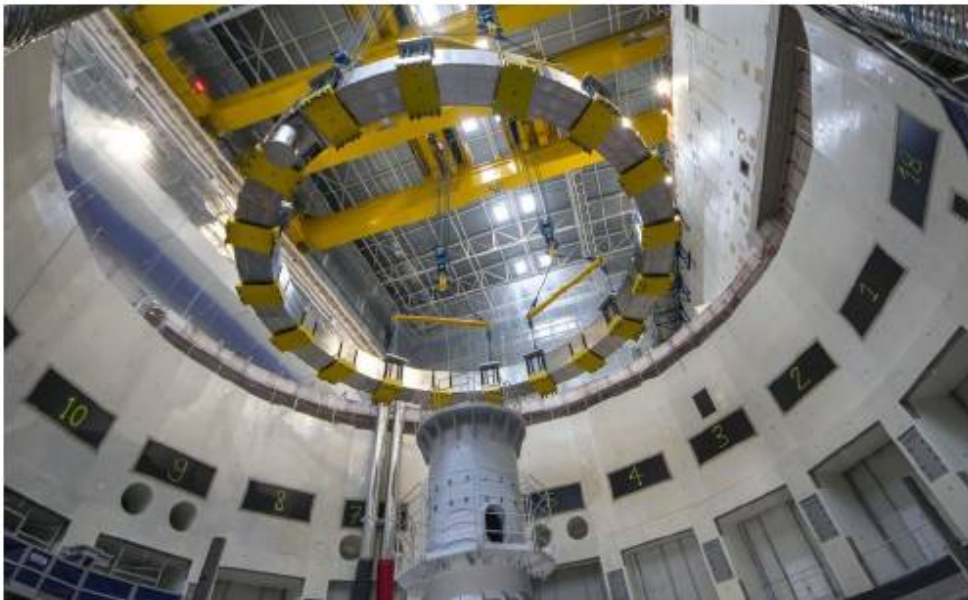
TF Coils #12 and #13 in SSAT#2



VVTS #6: Insulation Test

### 3. Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем

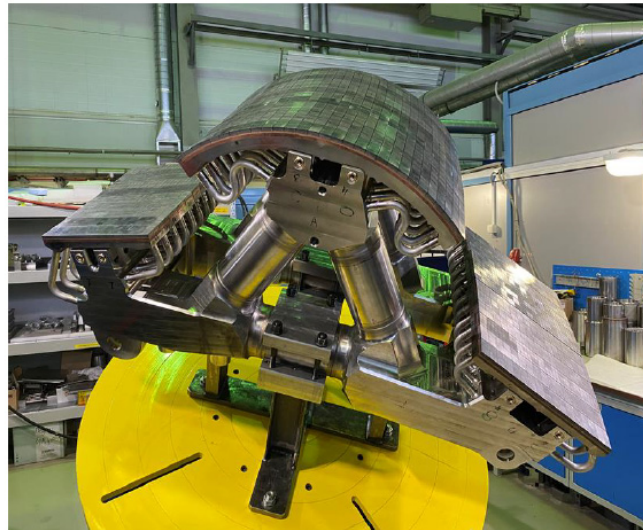
## Successful Installation of PF Coil #5 on 16 September 2021



### 3. Путь ITER - токамаки с умеренным магнитным полем

Существенный прогресс и реализация в железе ранее не существующих технических решений для ITER стимулирует все термоядерное направление

- Гигантские магнитные катушки
- Элементы первой стенки и дивертора
- Источники для СВЧ нагрева плазмы (170 ГГц, 1МВт гиротроны непрерывного действия)
- Источники для нагрева плазмы атомарными пучками (1 МэВ, 16 МВт непрерывно)



Full size prototype manufactured and supplied to ITER



#### First wall panel:

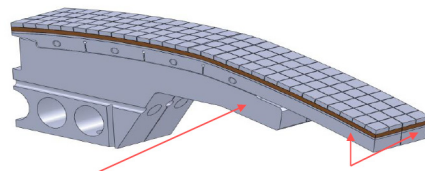
Thermal load (nomin./max.) : 2/5 MW/m<sup>2</sup>;

Number of thermal cycles : 30 000;

Panel dimensions : 2 x 1-1,5 x 0.35 m<sup>3</sup>;

Weight : 1000 kg;

Composition : SS-CuCrZr-Be (8 mm).



## 4. Токамаки с сильным магнитным полем

Основная проблема направления ИТЭР – колоссальные размеры и стоимость – есть следствие использования  $Nb_2Sn$  и  $NbTi$  сверхпроводников для магнитных катушек

Середина 2010х прорыв в разработке ВТСП пленок ReBCO (rare-earth barium copper oxide)

2021 промышленное производство SuperOx в России  
(ООО «С-Инновации», Москва) 2/3 мирового рынка!

Появилась возможность увеличить магнитное поле на катушках до 30 Т (>2 раз)

**Мощный толчок для разработки компактных реакторов с сильным магнитным полем**

США оказались готовы лучше всех...

## 2. Термоядерные реакции и критерий Лоусона

Что определяет размер (стоимость) реактора?

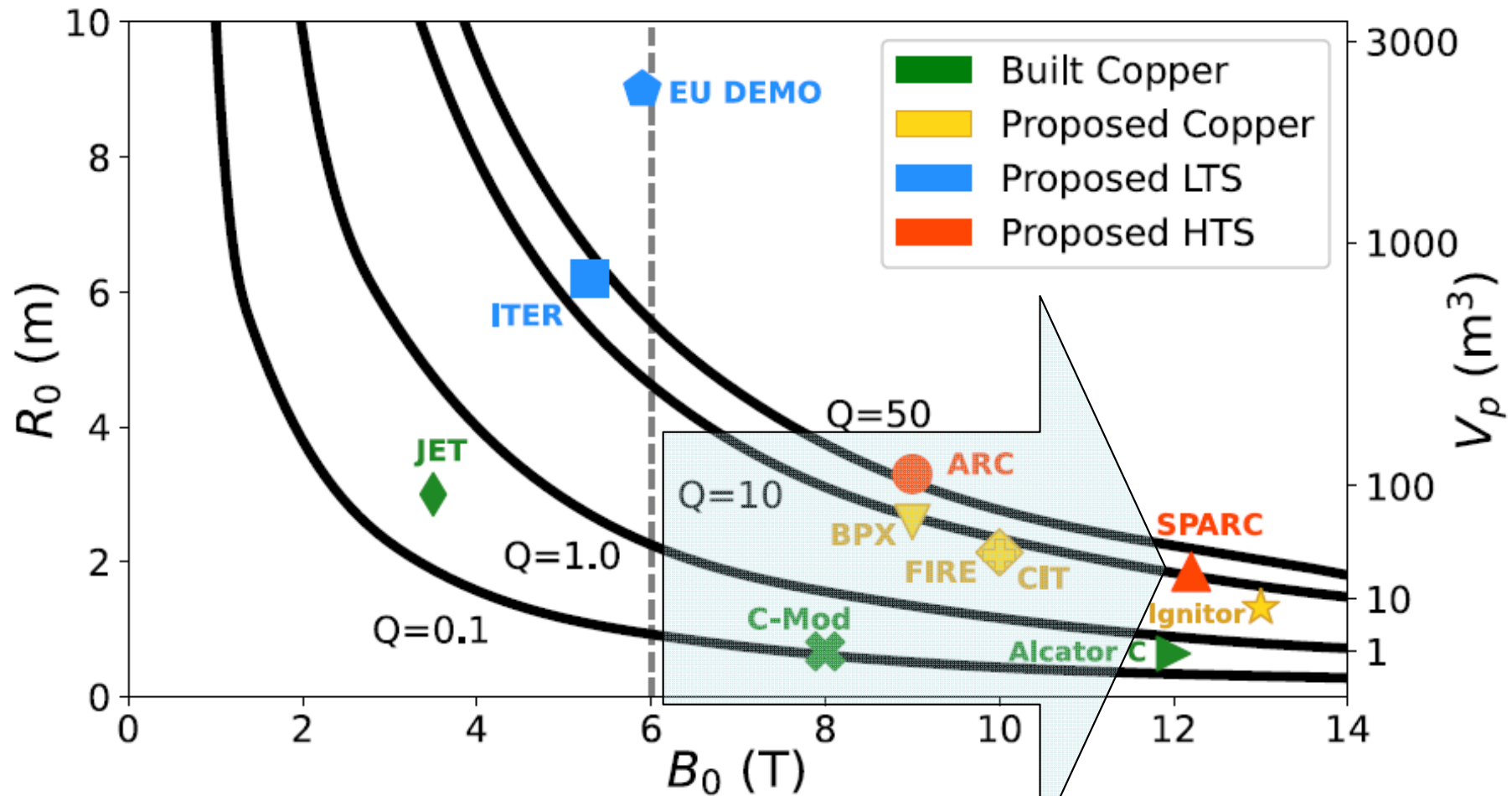


FIGURE 1. Fusion gain  $Q$  plotted against toroidal field on axis  $B_0$  and major radius  $R_0$ . Gain  $Q$  is calculated with the empirical scaling methods presented in § 4, keeping  $\epsilon = 0.31$ ,  $\kappa_a = 1.75$ ,  $\delta_{sep} = 0.54$ ,  $q^* = 3.05$ , impurity content and  $H_{98,y2} = 1$  constant, and limiting operation to below  $0.9n_G$ . In order to compare these calculated contours with specific design points, other

## 4. Токамаки с сильным магнитным полем

	$P_{ext}$ , МВт	$P_{fus}$ , МВт	Q	$R_0$ , м	a, м	$B_0$ , Т	запуск, год
JET	24	16	0.67	3	1.25	3.45	1983
ITER	50	500	10	6.2	2.0	5.3	2025
<b>SPARC</b>	<b>25</b>	<b>140</b>	<b>11</b>	<b>1.85</b>	<b>0.57</b>	<b>12.2</b>	<b>2025</b>

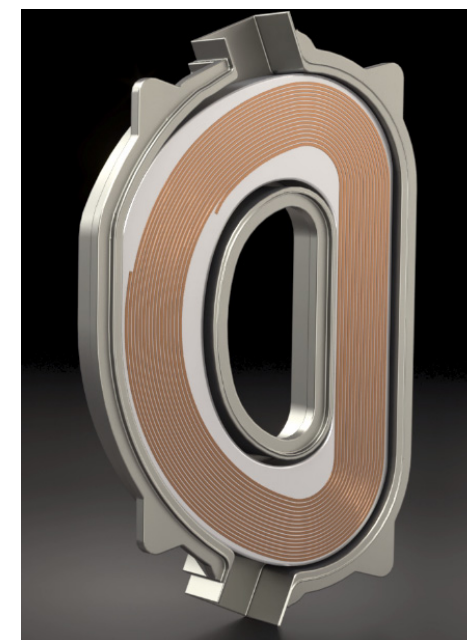
### SPARC

as Soon as Possible ARC



Commonwealth  
Fusion Systems

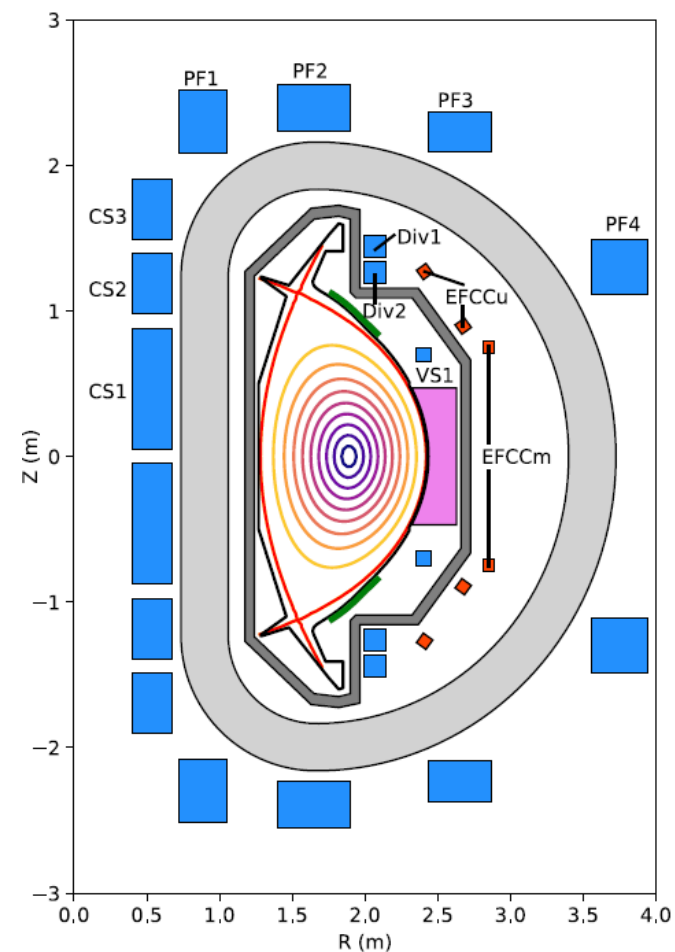
2014	«студенческий» проект ARC fusion reactor в MIT (REBCO 23T)
2018-2021	проектирование SPARC (YBCO 30T)
2021	рекордный объём частных инвестиций \$1.8b от CFS
2021-2025	конструирование
2021	демонстрация первой полноразмерной катушки
<b>2025</b>	<b>первая плазма</b>
<b>2025+sp</b>	<b>начало D-T экспериментов, Q&gt;2</b>





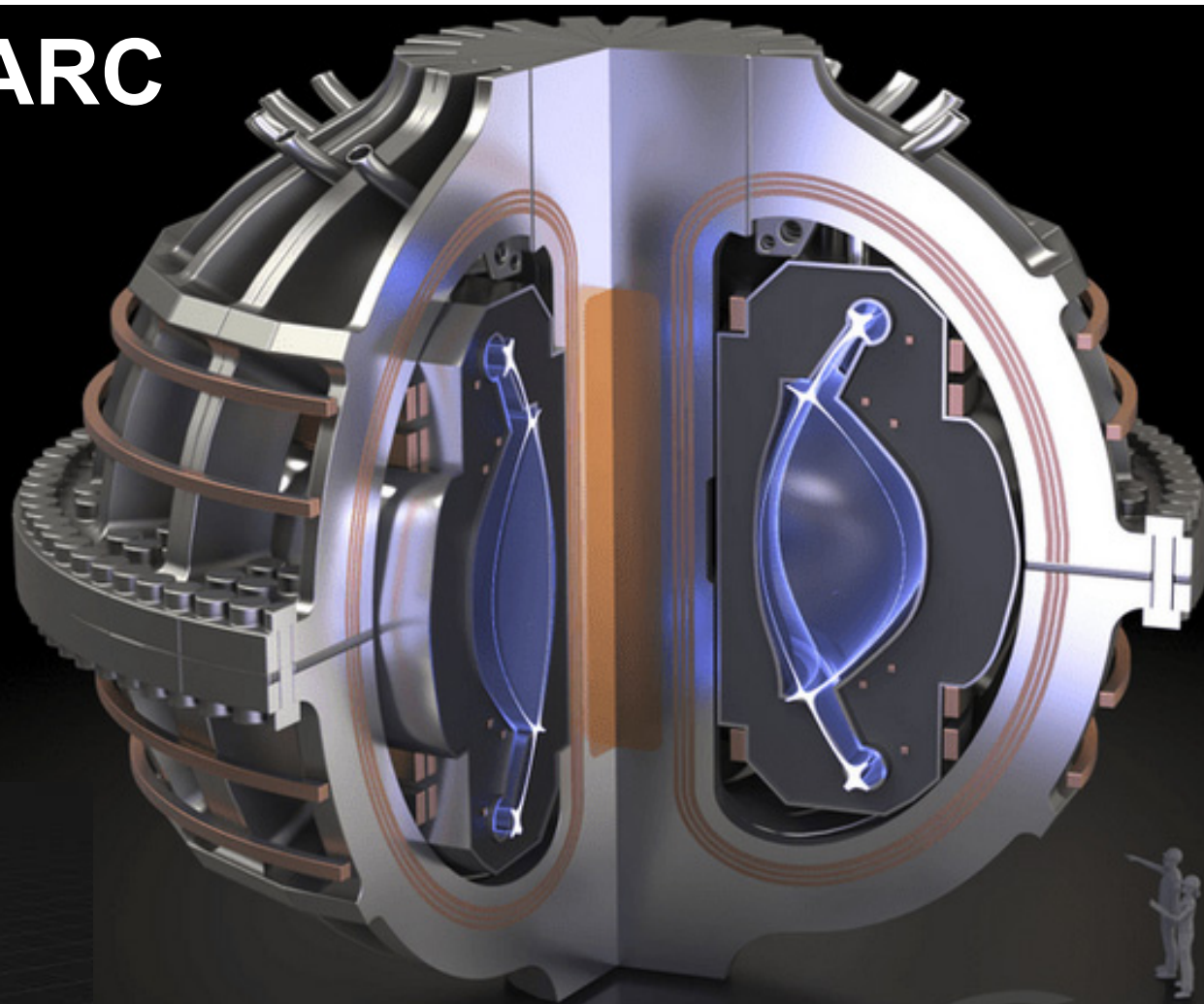
## 4. Токамаки с сильным магнитным полем

	$P_{ext}$ , МВт	$P_{fus}$ , МВт	Q	$R_0$ , м	a, м	$B_0$ , Т	запуск, год
JET	24	16	0.67	3	1.25	3.45	1983
ITER	50	500	10	6.2	2.0	5.3	2025
<b>SPARC</b>	<b>25</b>	<b>140</b>	<b>11</b>	<b>1.85</b>	<b>0.57</b>	<b>12.2</b>	<b>2025</b>



#### 4. Токамаки с сильным магнитным полем

ARC



ARC



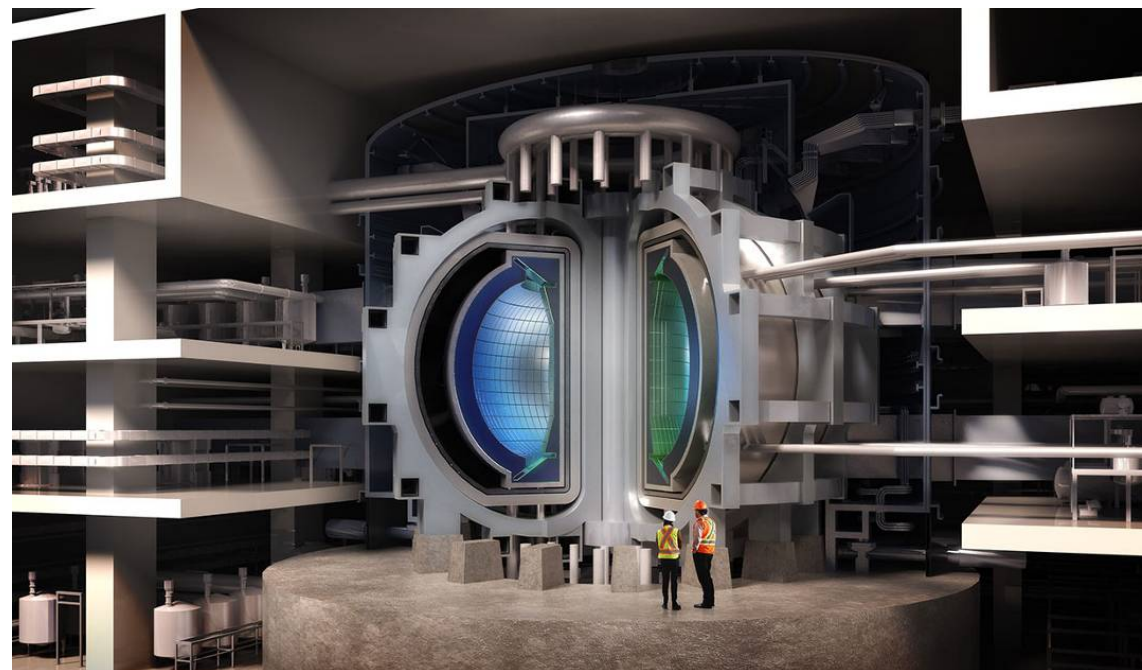
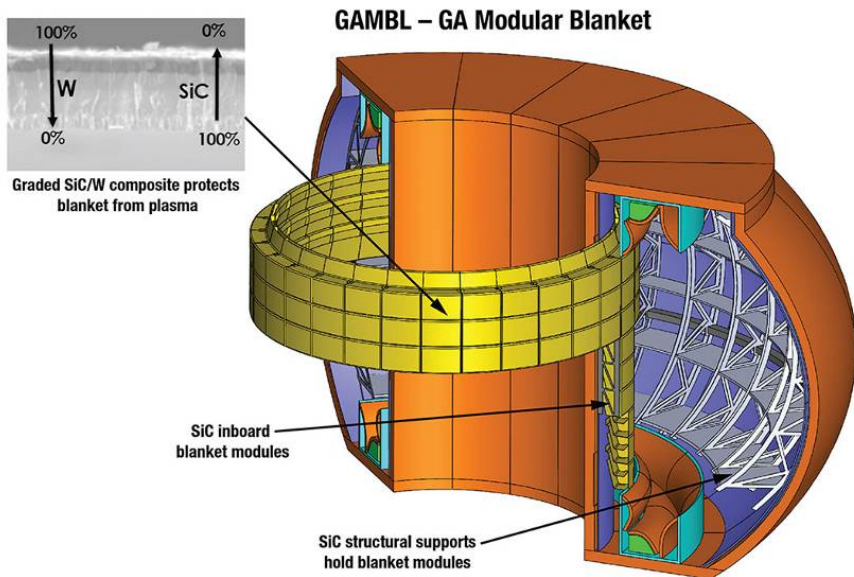
SPARC

## General Atomics Announces Plans for Fusion Pilot Plant



*Innovative concept leverages decades of expertise in fusion research and development*

**San Diego, Oct. 20** – Today, General Atomics (GA) announced a new concept for a fusion pilot plant (FPP)



- SiC бланкет (карбид кремния) с охлаждением жидким металлом (Li+...)
- Магнитная система – очень похож на ARC ???
- Микроволновый нагрев плазмы

### Бриллиантовый успех карбида кремния - Ростех

Апр 29, 2022 — Карбид кремния – это сверхтвёрдый кристалл с очень высокой термической, химической и радиационной стойкостью. Его невозможно расплавить даже..

## Китай

	$P_{ext}$ , МВт	$P_{fus}$ , МВт	Q	$R_0$ , м	a, м	$B_0$ , Т	запуск, год
ITER	50	500	10	6.2	2.0	5.3	2025
EU-DEMO	80	2000	25	>7	>2	6 Т	2051
<b>CFETR</b>	<b>?</b>	<b>1000 эл</b>	<b><math>\infty</math></b>	<b>7.2</b>	<b>2.2</b>	<b>?</b>	<b>&gt;2040</b>

EAST, J-TEXT, HL-2M      действуют 3 очень хороших токамака

CFETR    Chinese Fusion Engineering Testing Reactor (концепт)

зажигание, 1 ГВт мощности,

подключение в электрическую сеть,

воспроизводство трития

CRAFT    вспомогательный для CFETR, начато строительство в 2019 (6 лет)

BEST    Burning Plasma Experimental Superconducting Tokamak

анонсировано начало строительства 2022, первая плазма 2026, D-T в 2031

$Q=1(cw)/5$  – примерно ИРЭР по целям, но на ВТСП???

## Россия

	$P_{ext}$ , МВт	$P_{fus}$ , МВт	Q	$R_0$ , м	a, м	$B_0$ , Т	запуск, год
ITER	50	500	10	6.2	2.0	5.3	2025
SPARC	25	140	11	1.85	0.57	12.2	2025
<b>TRT</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>&gt;1</b>	<b>2.15</b>	<b>0.57</b>	<b>8</b>	<b>???</b>

Т-10, ФТ-2, Туман, Л-2М, Глобус-М2, **Т-15МД** действуют или модернизируются

ТРТ Токамак с реакторными технологиями (концепт 2019-2021, проектирование...)

Цель: отработка новейших технологий которых нет в ИТЭРе:

- ВТСП катушки
- литиевые элементы первой стенки и дивертор
- воспроизводство трития
- системы дополнительного нагрева плазмы (например 170 ГГц -> 230 ГГц)
- диагностики и системы управления для коммерческого реактора

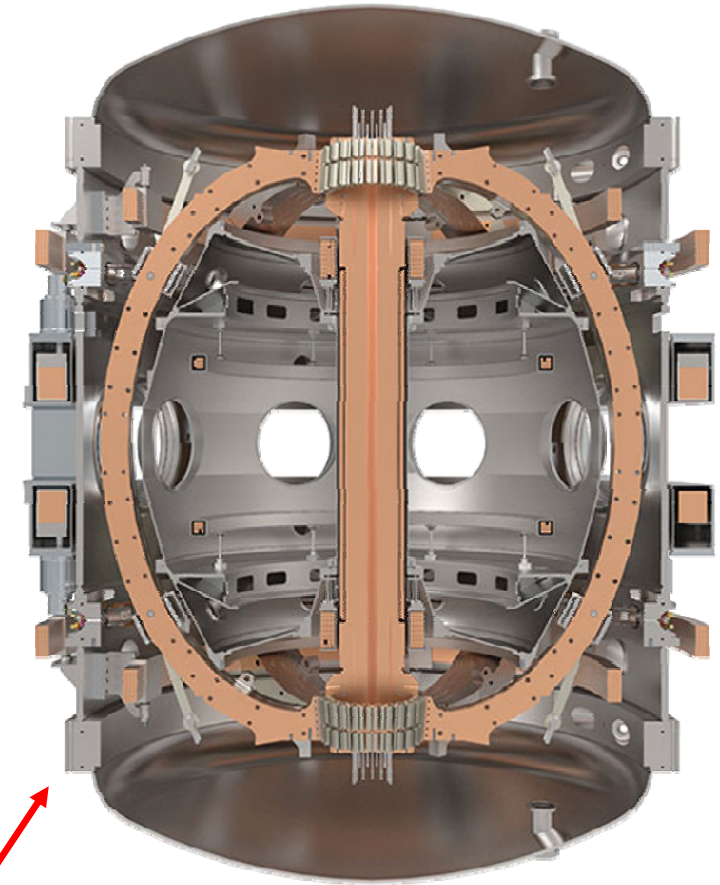
## 5. Сферические токамаки

- Развитие идеи «компактного токамака»
- Плазма более устойчива при  $A = R/a \sim 1$

$$nT_{TE} \propto \frac{H^2}{q^3} R^2 B_T^3 \left( \frac{\kappa^{\frac{1}{2}}}{A^3} \right)$$

- + требуется меньшее магнитное поле
- + возможна прямая конверсия энергии  $B$  в  $T$
- **нужен большой ток, это трудно но возможно!**

- Проще и дешевле «больших» токамаков
- **По каким правилам масштабируются до реактора?**



	Pegasus	START	Globus-M	Globus-M2	ST40	MAST	NSTX	MAST-U	NSTX-U
Aspect ratio	1.2	1.3	1.5	1.5	1.7	1.3	1.5	1.56	1.7
Major radius $R$ (m)	0.35	0.3	0.34	0.36	0.40	0.85	0.89	0.82	0.94
Minor radius $a$ (m)	0.29	0.23	0.23	0.24	0.24	0.65	0.61	0.53	0.55
Plasma elongation $\kappa$	2.6	1.8	2.0	2.0	2.5	2.1	2.5	2.5	2.75
Plasma triangularity $\delta$	0.50	0.50	0.50	0.30	0.35	0.50	0.70	0.50	0.50
Plasma current (MA)	0.15	0.30	0.25	0.5	2.00	1.2	1.5	2.00	2.00
Toroidal field at $R$ (T)	0.17	0.23	0.5	1.0	3.00	0.52	0.55	0.78	1.00
Max. pulse length (s)	0.05	0.05	0.2	0.7	2.0	0.7	1.85	5.0	5.0
Auxiliary heating power (MW)	0.0	0.8	1.0	2.0 (NB), 1.0 (RF)	5.0	3.0	6.0 (NB), 6.0 (HHFW)	5.0 (7.5)	12.0 (NB) 6.0 (HHFW)

## 5. Сферические токамаки (Великобритания)

MAST Upgrade  
STEP

модернизированный Mega Ampere Spherical Tokamak, запущен в 2020  
Spherical Tokamak for Energy Production, UKAEA  
государственный проект т/я электростанции класса DEMO  
2019-2024 концепция, 2032-2040 постройка

ТОКАМАК ENERGY

Tokamak Energy 

ST25-HTS

2014 первый токамак из ВТСП

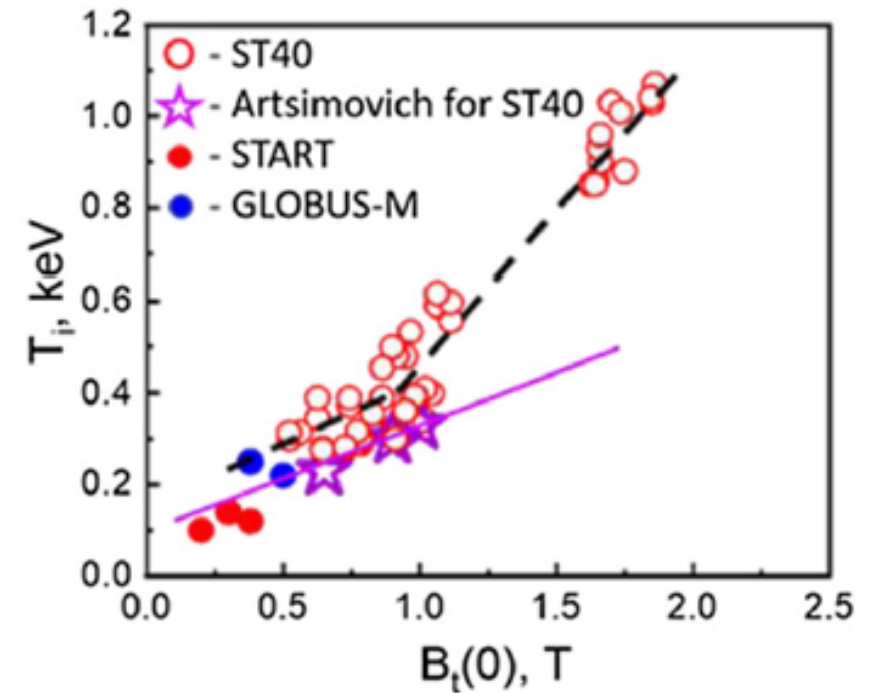
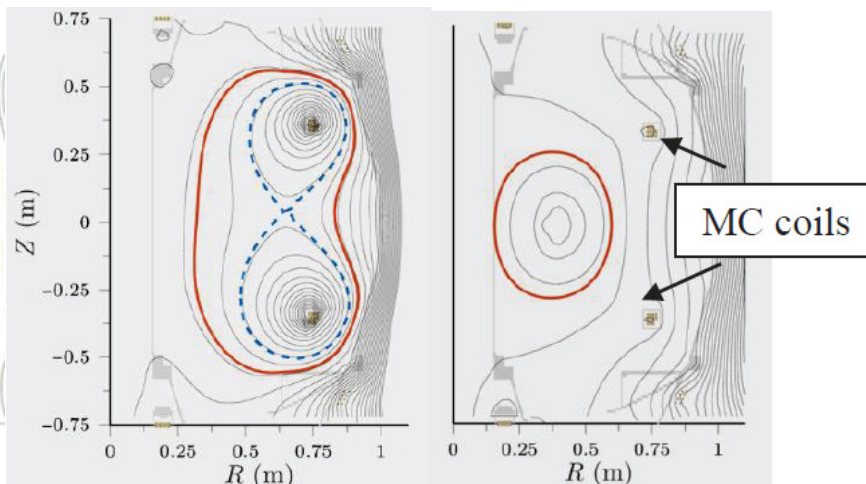
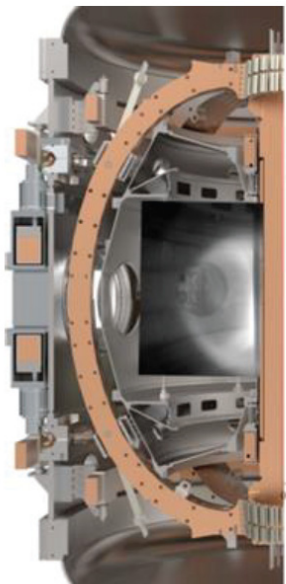
2021 £117m

ST40

2017 запуск, 2019  $T=1.2$  keV, 2022  $T=10$  keV ???

ST80-HTS

2026 завершение строительства, прототип реактора с ВТСП

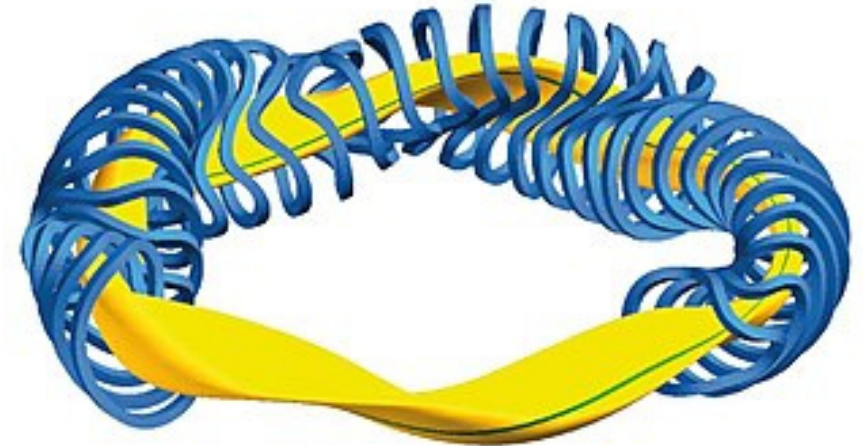


## 6. Стеллараторы

	$P_{ext}$ , МВт	$P_{fus}$ , МВт	Q	$R_0$ , м	a, м	$B_0$ , Т	запуск, год
JET	24	16	0.67	3	1.25	3.45	1983
ITER	50	500	10	6.2	2.0	5.3	2025
<b>Wendelstein 7X</b>	<b>14</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>5.5</b>	<b>0.53</b>	<b>3</b>	<b>2015</b>

### Физика

- Всё магнитное поле создается внешними непланарными катушками
- Может быть оптимизирован – как можно больше внутренних симметрий
- Принципиально стационарное устройство

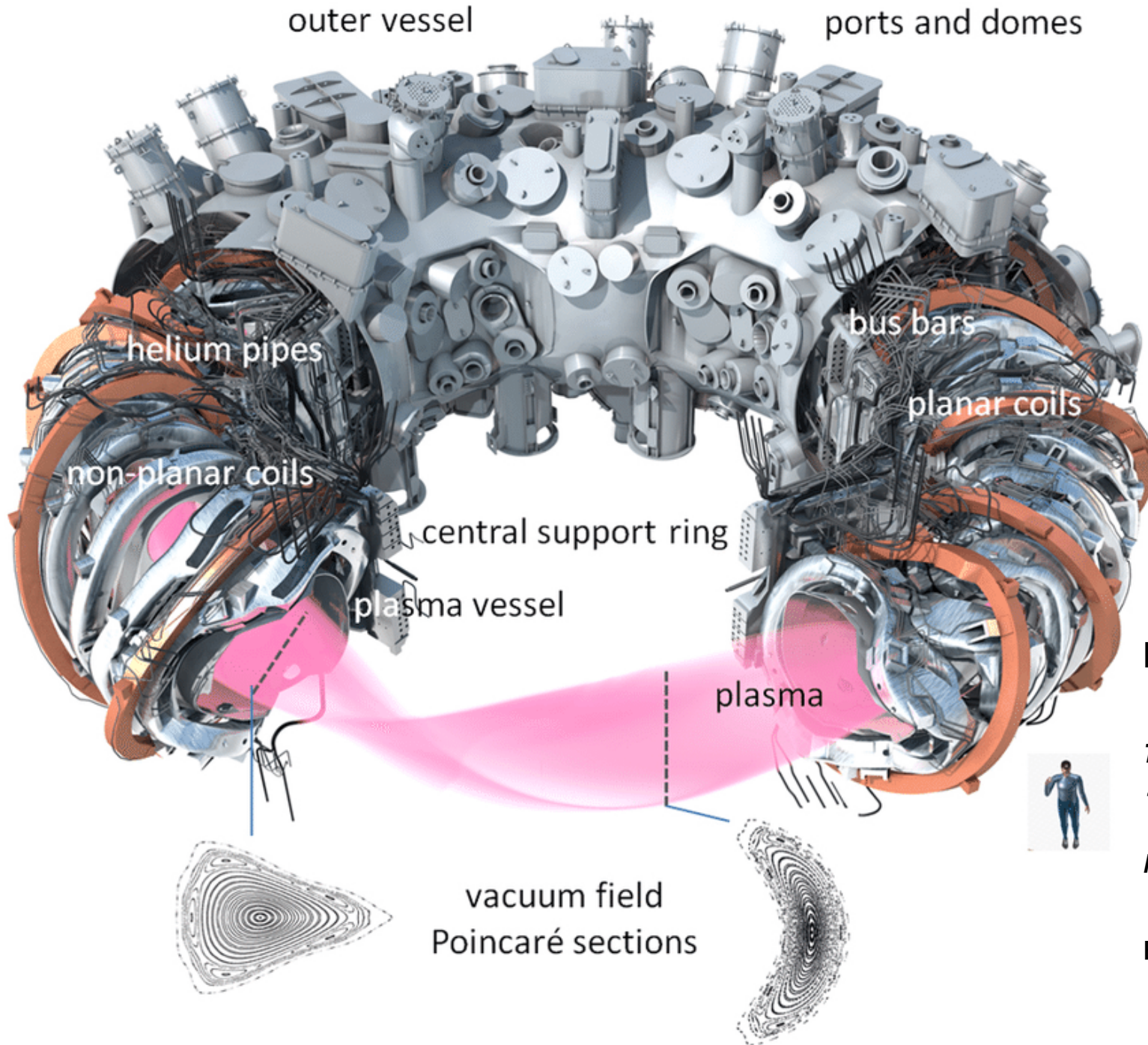


### На практике

- На один шаг отстают от токамаков
- Очень сложны с инженерной точки зрения и очень дорогие
- Очень хорошо работают сразу после сборки (лучше чем ожидалось в расчетах)



# Стелларатор Wendelstein 7X, Грайфсвальд, Германия



**Рекорд (2018)**

$$\tau = 200 \text{ ms}$$

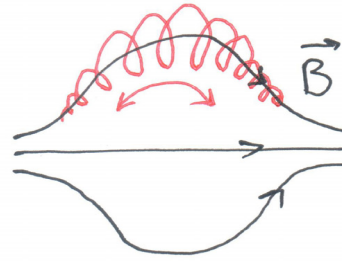
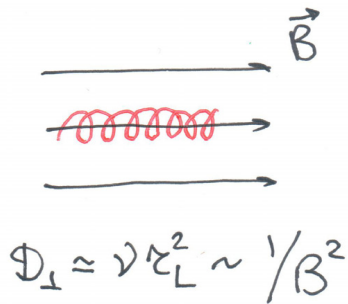
$$T_i = 4 \text{ keV,}$$

$$n = 0.8 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

время разряда 30 мин

## 7. Открытые магнитные ловушки

①

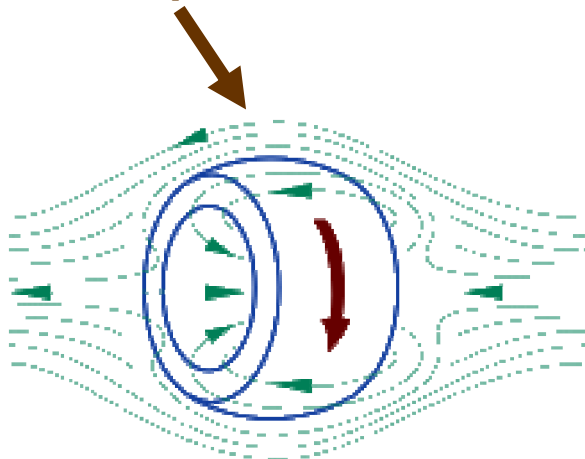


*Открытые ловушки:*

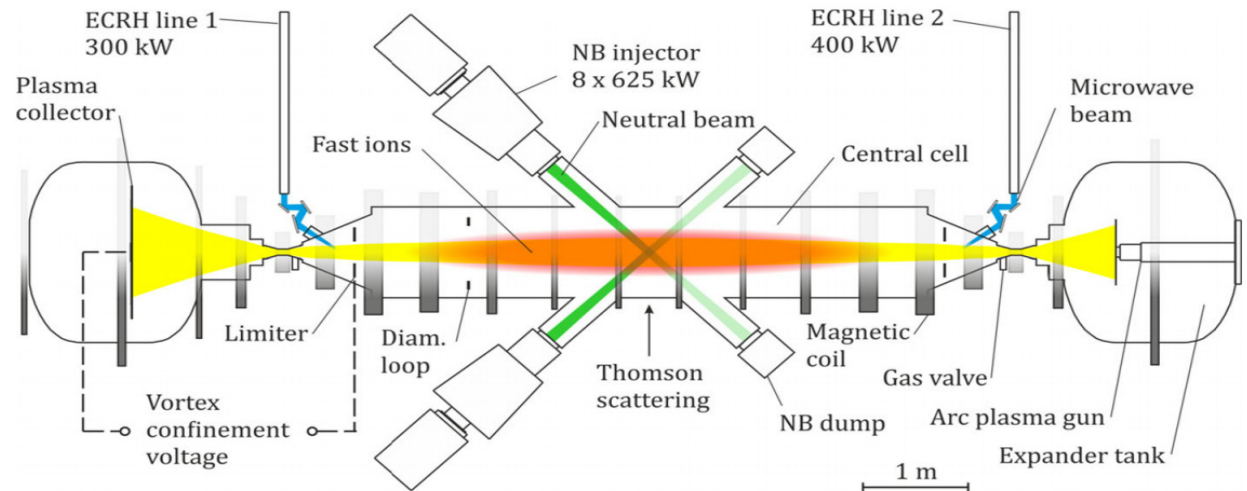
*Проблема продольных потерь частиц и энергии*

- Проще, легче контролировать неустойчивости, но большие продольные потери
- Т/я реакции на быстрых ионах от атомарных пучков ( $E_i \sim 15-50$  keV вместо  $T_i \sim 5-15$  keV)
- Пути кардинального улучшения удержания вдоль магнитного поля :
  - 1) удержание определяется  $B_{\max} / B_{\min}$ , уменьшить  $B_{\min}$  за счет диамагнетизма
  - 2) использовать много «пробок» последовательно

**пучок нейтралов**



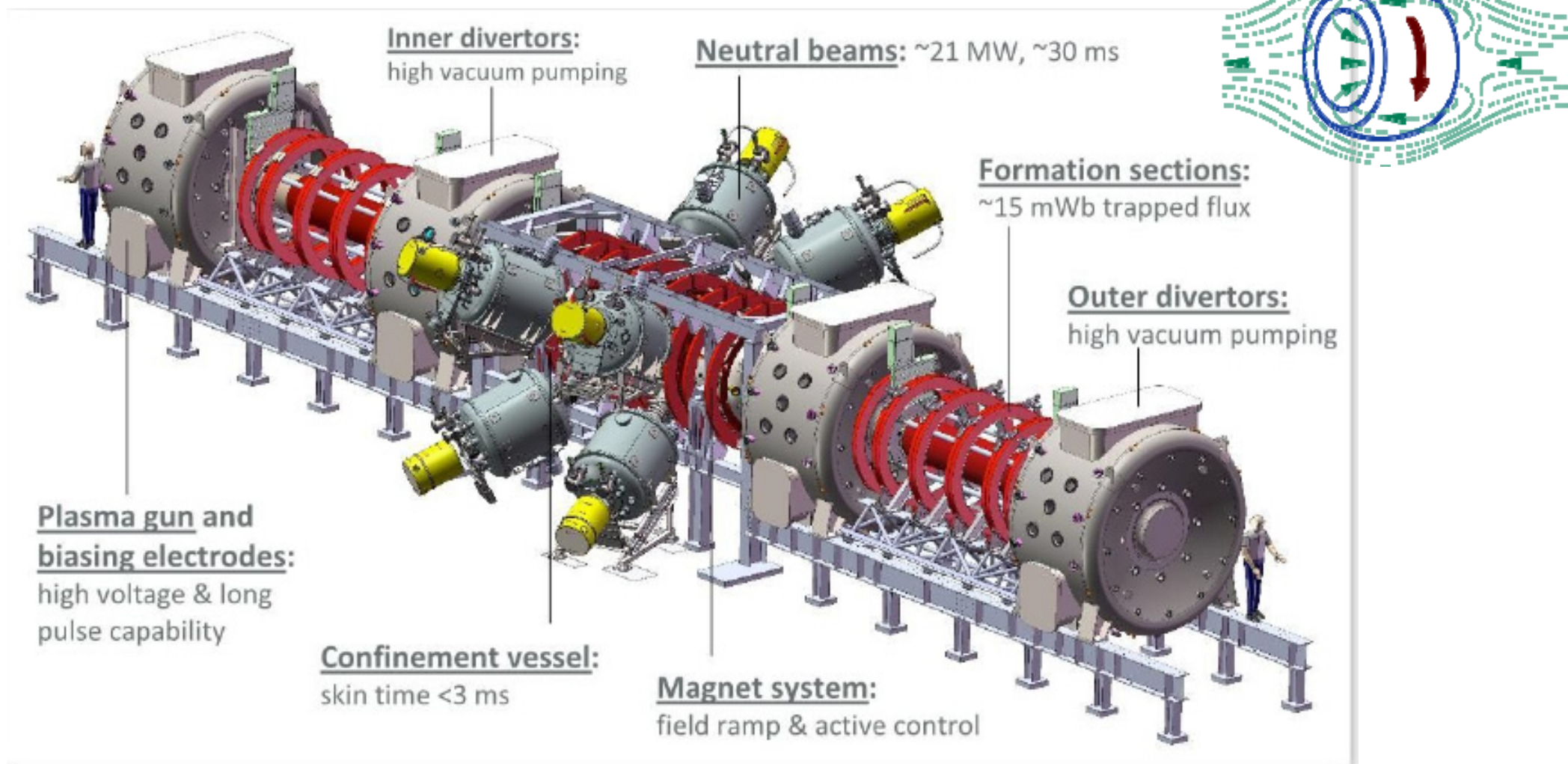
компактный тороид (FRC)



газодинамическая ловушка

## 7. Открытые магнитные ловушки (Tri Alfa Energy)

C-2 (2010) C-2U (2015) **C-2W (2017)** Copernicus (D-T реактор, 2030) ...



Details can be found in: [H. Gota et al., Nucl. Fusion 59, 112009 \(2019\)](#)

2021

продемонстрирован устойчивый разряд с длительностью 30 мс,  
 $T_i \approx 5$  кэВ,  $T_e \approx 0.6$  кэВ,  $n > 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и  $\langle \beta \rangle \geq 1$

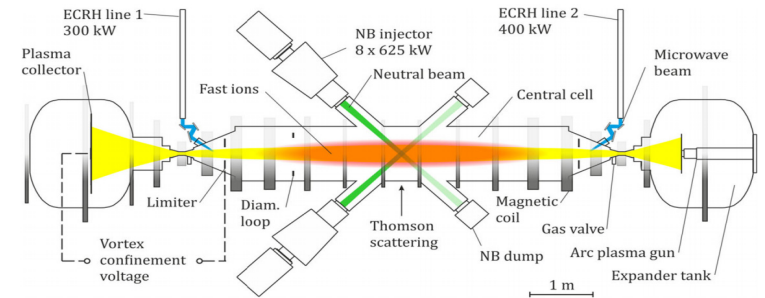
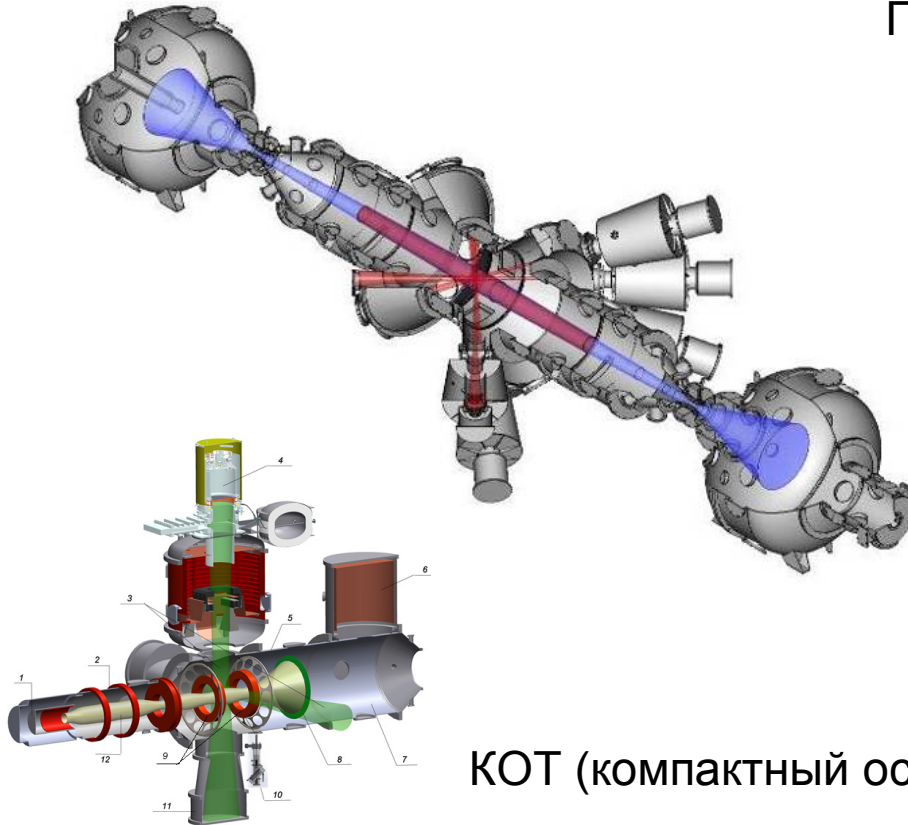
35

Funding \$1.2 billion

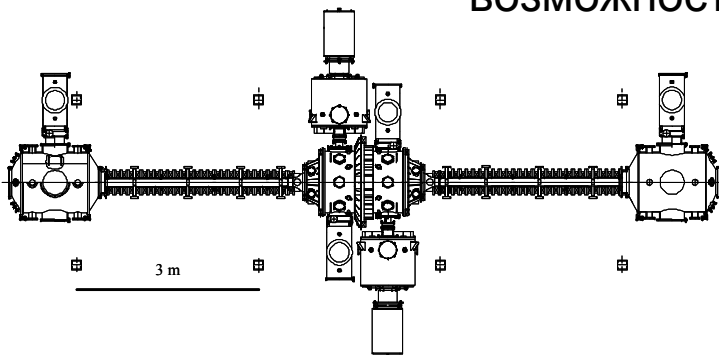
## 7. Открытые магнитные ловушки (ИЯФ СО РАН)

ГДЛ (газодинамическая ловушка):

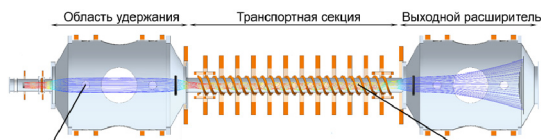
модель источника D-D нейтронов  
т/я реакции на быстрых ионах (10 кэВ)  
10 мс,  $n \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_i \approx 200 \text{ эВ}$ ,  $T_e \approx 0.6 \text{ кэВ}$



КОТ (компактный осесимметричный торонд):  
возможность «накачать» КОТ пучками



ГОЛ-НБ и СМОЛА: многопроходные системы для  
подавления продольных потерь частиц и энергии



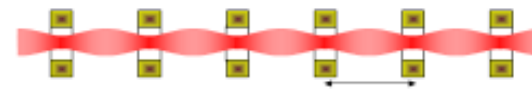
Создание физической базы для  
открытых ловушек с реакторного класса

## 7. Открытые магнитные ловушки (ИЯФ СО РАН)

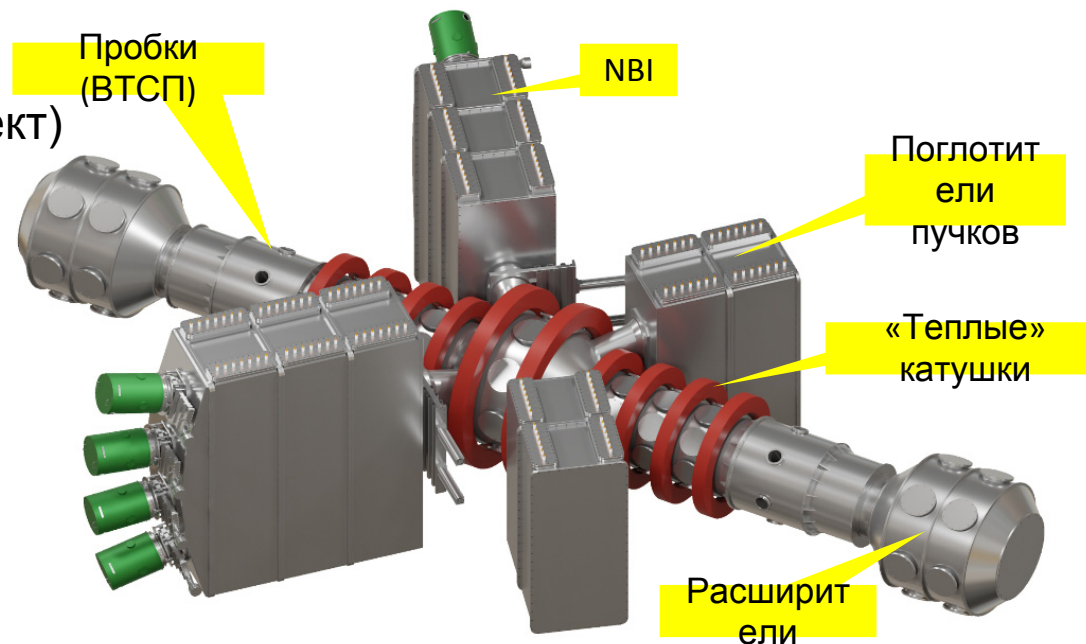
**синтез всех достижений**

ГДМЛ (газодинамическая многопробочная ловушка)

- Источник D-D нейтронов
- Исследование технологий для стационарного D-D реактора



Этап 1  
(эскизные проект)

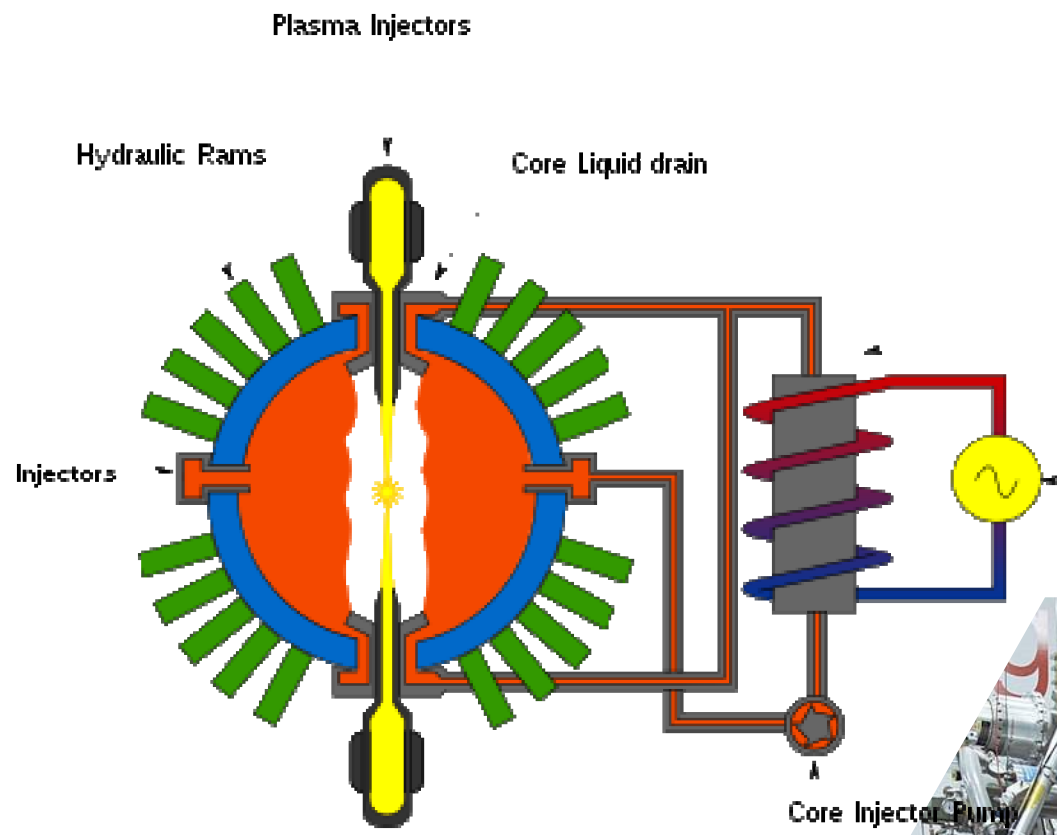


Параметр	Значение
Расстояние между пробками	~10 м
Радиус плазмы	10 – 30 см
Магнитное поле:	
в центре	0 – 1.5 Тл
в пробках	до 20 Тл
длительность импульса	2 - 4 с
Атомарная инжекция ( $H^0$ )	
суммарная мощность	~ 22 МВт
длительность работы	~1 с
энергия нейтралов	30 кэВ
Дополнительный ЭЦРН:	
частота	170 ГГц
суммарная мощность	4 МВт
длительность импульса	2 с

# 8. Развитие идеи «магнитная мишень» (magnetic target fusion)

generalfusion

As of 2021, General Fusion had received \$430 million in funding



## 9. Резюме: что внушает нам оптимизм / поводы для сомнений

- Переход в ВТСП катушкам → более компактный и дешевый реактор
- Конструкция и материалы первой стенки → коммерческий реактор
- Стабильное развитие систем внешнего нагрева плазмы  
+  
• «Практическое» понимание физики режимов с улучшенным удержанием плазмы  
=  
• Уверенность в реализации “advanced” сценариев, использующих преимущества точного профилирования плазмы, системы обратных связей и управления горением разряда в реакторе в режиме реального времени
- Развитие концепций, альтернативных токамакам
  - резервный вариант энергетического ТЯ реактора
  - сверхмощный источник ТЯ нейтронов
- Масштабируемость технологий
- Физика термоядерного горения – как повлияют альфа-частицы при  $Q \gg 1$
- Спекуляции, экономическая рентабельность с учетом развития энергетики

## Economic viability [\[edit\]](#)

Prior to the introduction of [renewable energy](#) sources such as [solar](#) and [wind power](#), fusion was touted as the future of [clean](#) and [net zero carbon energy](#).<sup>[10]</sup> However, the introduction, greater widespread application, and utilisation of renewable energy has drastically altered the energy landscape. For instance, renewables are projected to supply 74% of the global energy by 2050.<sup>[11]</sup> Moreover, with renewable energy prices falling, the economic viability of fusion power has been brought to the forefront of the discourse of the future economics of energy.<sup>[10]</sup>

Presently, economists suggest [fusion power](#) is unlikely to be as cheap as [renewable energy](#).<sup>[10]</sup> Fusion plants, much like [fission plants](#), will have large start up and [capital costs](#) as the cost of the materials, machinery and infrastructure required to construct these fusions plants is likely to be exorbitant. Moreover, the operation and maintenance of these highly specialised plants are likely to be costly as well.<sup>[10]</sup> While the operation and construction costs of the CFETR are not well known, an EU DEMO fusion concept is projected to have a [levelized cost of energy](#) (LCOE) of \$121/MWh.<sup>[12]</sup>

Furthermore, economists suggest that fusion energy becomes \$16.5/ MWh more costly for every \$1 billion increase in the price of fusion technology.<sup>[10]</sup>

This high LCOE is largely a result of high capital costs incurred in the construction of fusion plants.<sup>[10]</sup>

In contrast, the LCOE of renewables appears substantially lower. For instance, the LCOE of solar energy appears to be \$40-\$46/ MWh, [onshore wind](#) is estimated at \$29-\$56/ MWh, and [offshore wind](#) is approximately \$92/ MWh.<sup>[13]</sup> As such, these cost-effective options appear to be the more economically viable ones.<sup>[10]</sup>

