



РОСАТОМ

Задачи и перспективы отечественной программы по управляемому термоядерному синтезу

XVII конференцию “Забабахинские научные чтения”

19–23 мая 2025 года, ФГУП “РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина” г. Снежинск.

Аникеев Андрей Витальевич

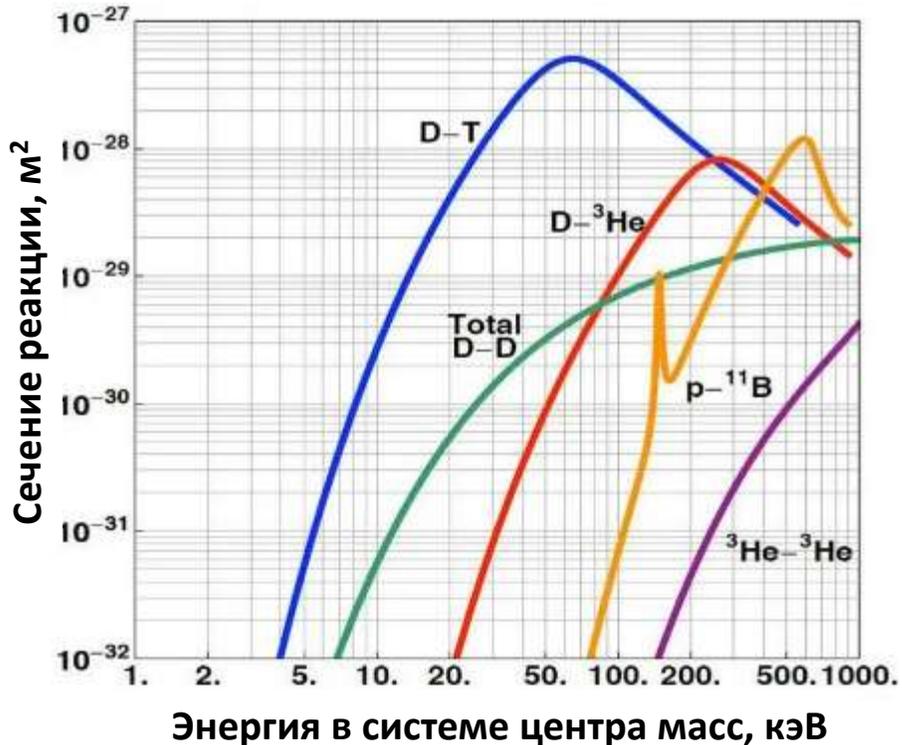
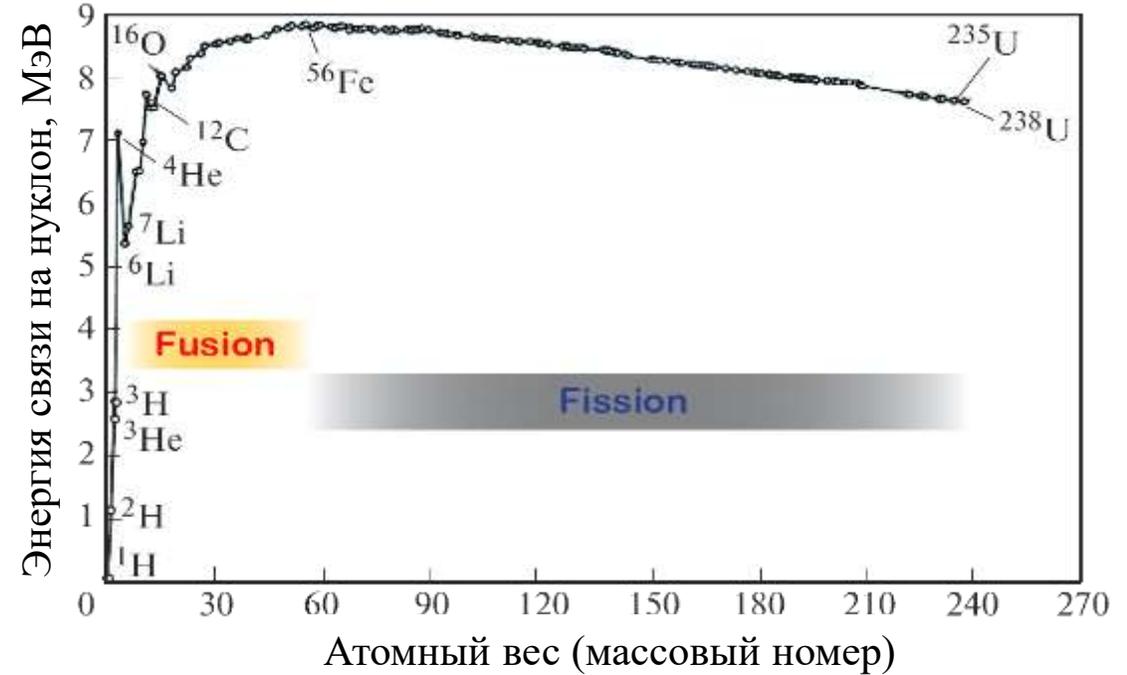
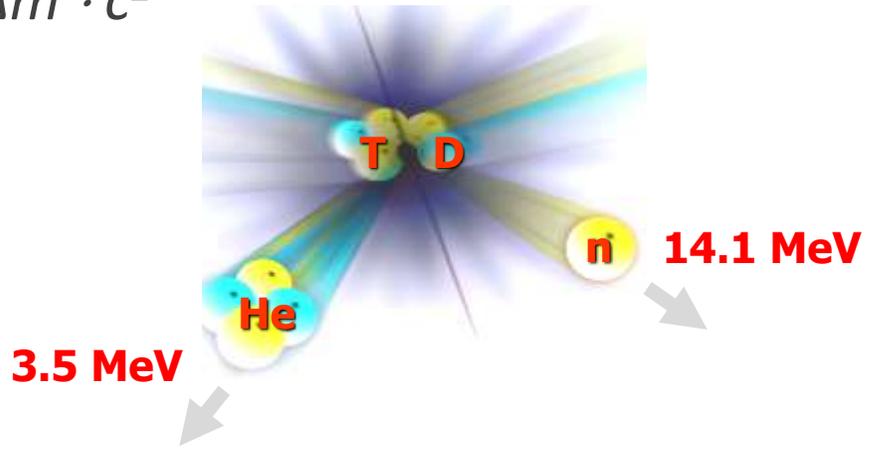
Руководитель проектного офиса по управлению УТС

Как работает термоядерный синтез?



РОСАТОМ

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$



Наиболее интересные для УТС реакции:

- $D + D = {}^3\text{He} (0,82 \text{ МэВ}) + n (2,45 \text{ МэВ}) + 3,25 \text{ МэВ}$
- $D + D = T (1,01 \text{ МэВ}) + p (3,03 \text{ МэВ}) + 4,04 \text{ МэВ}$
- $D + T = {}^4\text{He} (3,52 \text{ МэВ}) + n (14,06 \text{ МэВ}) + 17,6 \text{ МэВ}$
- $D + {}^3\text{He} = {}^4\text{He} (3,67 \text{ МэВ}) + p (14,68 \text{ МэВ}) + 18,3 \text{ МэВ}$
- $p + {}^{11}\text{B} = 3 {}^4\text{He} + 8,7 \text{ МэВ}$

- ✓ практически неограниченные топливные ресурсы;
- ✓ отсутствие выбросов в атмосферу окислов углерода и азота (как и для атомных электростанций);
- ✓ нецепной характер термоядерных реакций, благодаря чему в термоядерном реакторе не может иметь место неконтролируемый рост мощности;
- ✓ естественная возможность прямого преобразования энергии (без теплового цикла);
- ✓ внутренне присущая безопасность в отношении запроектных аварий.

D-T синтез

n – концентрация ионов $\geq 10^{20} \text{ м}^{-3}$

T – температура ионов $\geq 10^8 \text{ К}$

τ_E – энергетическое время жизни $\geq 1 \text{ с}$

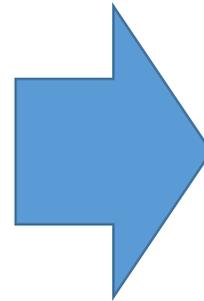
Тройное произведение

$$n \tau_E T \geq 3,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$$

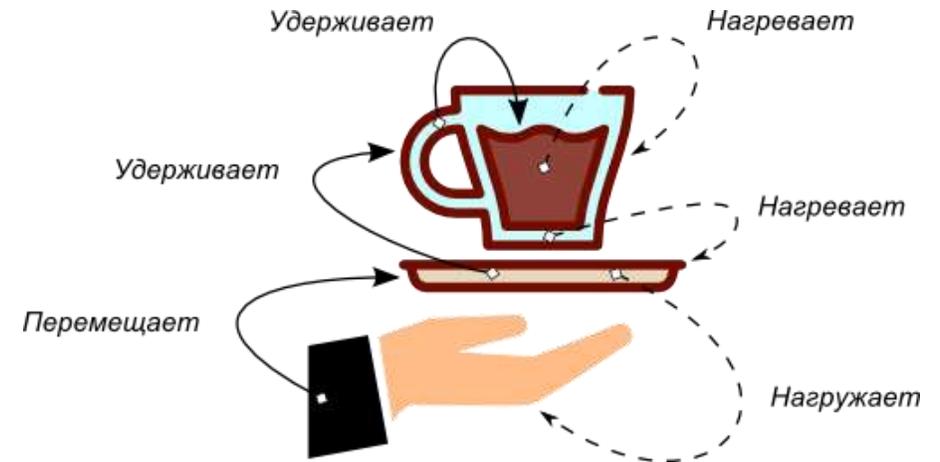
подпитка топливом

удержание

нагрев



Удерживать и нагреть!



$$Q = \frac{\text{получено}}{\text{вложено}} > 1 (>5)$$

D-T синтез

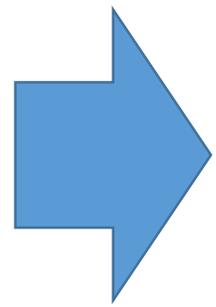
n — концентрация ионов $\geq 10^{20} \text{ м}^{-3}$

T — температура ионов $\geq 10^8 \text{ К}$

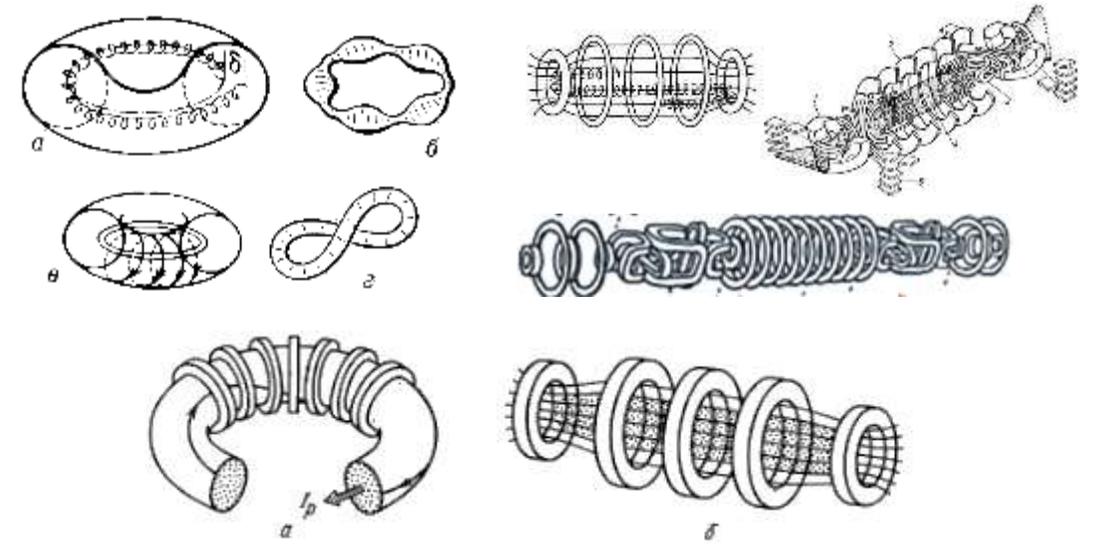
τ_E — энергетическое время жизни $\geq 1 \text{ с}$

Тройное произведение

$$n \tau_E T \geq 3,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$$



Удержать и нагреть!



$$Q = \frac{\text{получено}}{\text{вложено}} > 1 (>5)$$

Как устроен токамак?

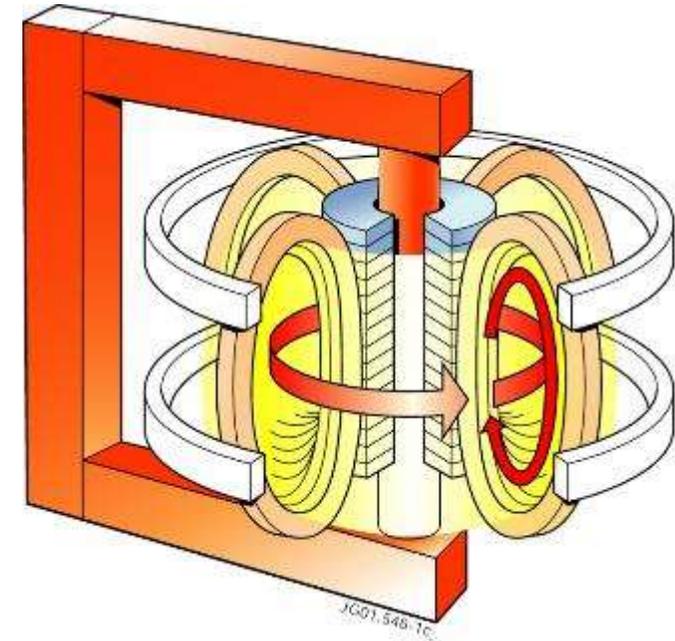


- Токамак – аббревиатура слов:

ТОк, КАмера, МАгнитная Катушка

Токамак – устройство для удержания высокотемпературной тороидальной плазмы, включающее:

- **Катушки** для создания **тороидального магнитного поля**
- **Трансформатор** с **первичной обмоткой** для создания **тороидального тока** в **плазме**
- Ток создает **полоидальное магнитное поле** и закручивает по винту силовые линии, образуя идеальную ловушку для частиц плазмы
- **Дополнительные катушки** придают форму плазме

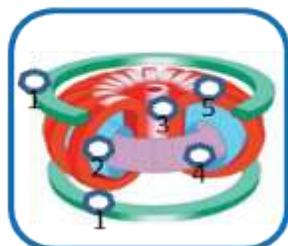


Термояд в России, основные вехи развития токамаков

МТР (1950)



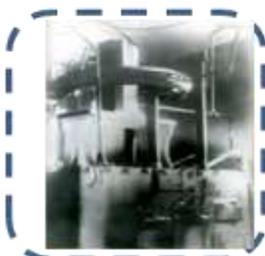
И.Е.Тамм А.Д.Сахаров



«Большая модель» МТР (А.Д.Сахаров, И.Е.Тамм 1950)
 ($R/a=12/2$ м, $B_T=5$ Тл, $I_p=0,2$ МА, $n_e=3 \cdot 10^{20}$ м⁻³, $T_0=100$ кэВ)

ТОКАМАК (ТОроидальная КАмера МАгнитная Кагушка)
 И.Н.Головин 1957 г.

1955 - 1965



ТМПИ - 1955

- T-1 1957
- T-2 1959
- T-3 1960
- T-5 1961, ФТ-1 1965
- ТМ-1
- ТМ-2 1962
- ТМ-3 1965

T-3A 1967



- T-6 1970
- T-4 1971
- ТО-1 1972
- ТО-2 1976
- ТУМАН-2 1971
- ТУМАН-2А 1976
- ТУМАН-3 1976
- ФТ-2

Термояд в России.
 История

1967 - 2021



T-10, 1975

T-11 1975



Гибридный термоядерный реактор (1978)

T-7 (NbTi) 1979

ТМГ 1982

ТСП 1987

T-11M 1983



T-15 (Nb₃Sn) 1988

Глобус-М 1999
 Глобус-М2 2020
 КТМ



T-15MD 2021



1971 - 1990

1972 году Л.А.Арцимовичем и В.Д.Шафрановым предложена концепция вытянутого сечения с полоидальным дивертором.



T-8 1973
 T-9 1973

Вытянутое поперечное сечение

T-12
 T-13
 ТВД

Полоидальный дивертор

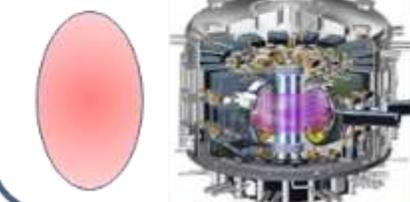


Л.А.Арцимович В.Д.Шафранов

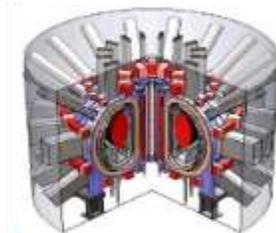
ОТР (РФ, 1988)

INTOR (1980)

ITER (Nb₃Sn, NbTi, 1985)



TRT 2020



Направление Токамаков

Крупнейшие термоядерные установки (токамаки) в мире

Международный проект ИТЭР

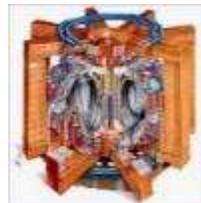


Разряд > 400 с
Нагрев 73 МВт
Радиус 6,2 м

Начало работы 2035 год

Зарубежные установки

JET  **закрит**



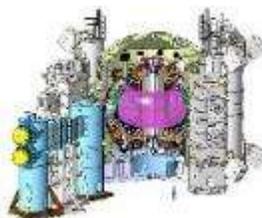
Разряд 15 с
Нагрев 38 МВт
Радиус 2,96 м

KSTAR  **действующий**

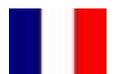


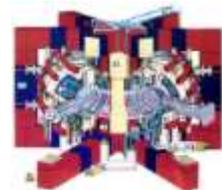
Разряд 300 с
Нагрев 26 МВт
Радиус 1,7 м

JT-60SA  **действующий**



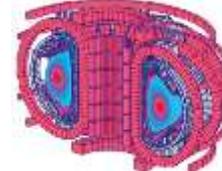
Разряд >100 с
Нагрев 41 МВт
Радиус 2,96 м

WEST  **действующий**



Разряд > 1000 с
Нагрев 20 МВт
Радиус 2,5 м

EAST  **действующий**



Разряд > 1000 с
Нагрев 8 МВт
Радиус 1,8 м

DIII-D  **действующий**



Разряд 5 с
Нагрев 23 МВт
Радиус 1,67 м

В России



T-11 M



действующий
Разряд 0,3 с
Нагрев --- МВт
Радиус 0,7 м

T-15 МД **действующий модернизация**



Разряд 20 с
Нагрев 25 МВт
Радиус 1,48 м
Полная мощность к 2030 году

Проект ТРТ



Разряд > 100 с
Нагрев 50 МВт
Радиус 2,15 м
Техпроект 2024 г.
Физпуск 2035 г.

! Всего в мире построено более 300 токамаков

ТРТ – Токамак с Реакторными Технологиями

Особенности текущего этапа мировых исследований в области УТС



РОСАТОМ



ИТЭР 80%
ГОТОВ

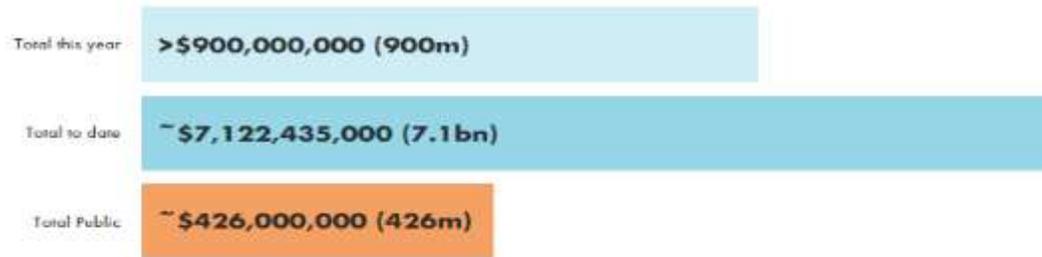
Вес
23 тыс. т

Объём
плазмы
840 куб. м

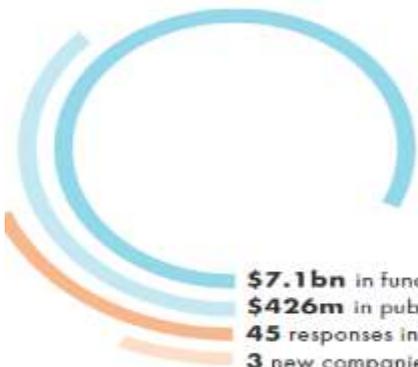
Термомод.
мощность
500 МВт

HIGHLIGHTS TO DATE

1. TOTAL FUNDING*



2. CHANGE SINCE 2023 SURVEY



- \$7.1bn in funding, compared to \$6.2bn at time of 2023 survey
- \$426m in public funding, compared to \$271m in 2023
- 45 responses in 2024 vs 43 in 2023
- 3 new companies emerged and added to our survey, while one withdrew from the commercial industry.

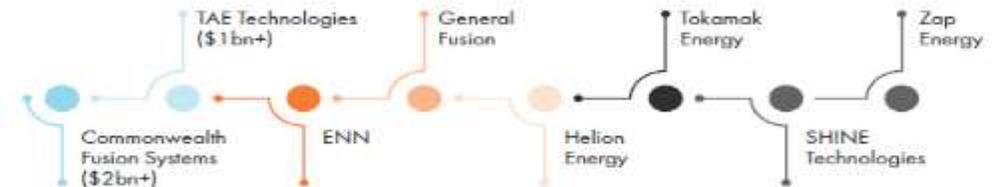
* Some figures have been converted to dollars/rounded

3. NOTABLE INVESTMENTS SINCE 2023 SURVEY*



* Several other large investments have not yet been publicly announced so are not included here

4. COMPANIES WITH \$200M INVESTMENT OR MORE



5. LOCATION

By primary HQ



Особенности текущего этапа мировых исследований в области УТС



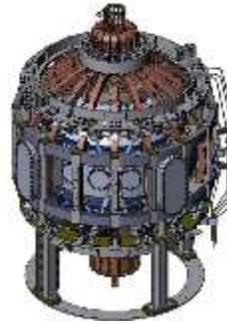
POCATOM

	<i>Действуют</i>	<i>Строятся</i>	<i>Проектируются</i>
	DIII-D 	SPARC 	ARC + GA-FPP 
	EAST HL-2M  	BEST 	CFETR 
	QUEST 	JT-60SA 	JA-DEMO 
 	JET AUG  	DTT ST-80  	STEP 
	2023	2030	2040-2045

Действуют



T-11M
Глобус-M2



2024

Строятся

T-15 МД



2028

Проектируются

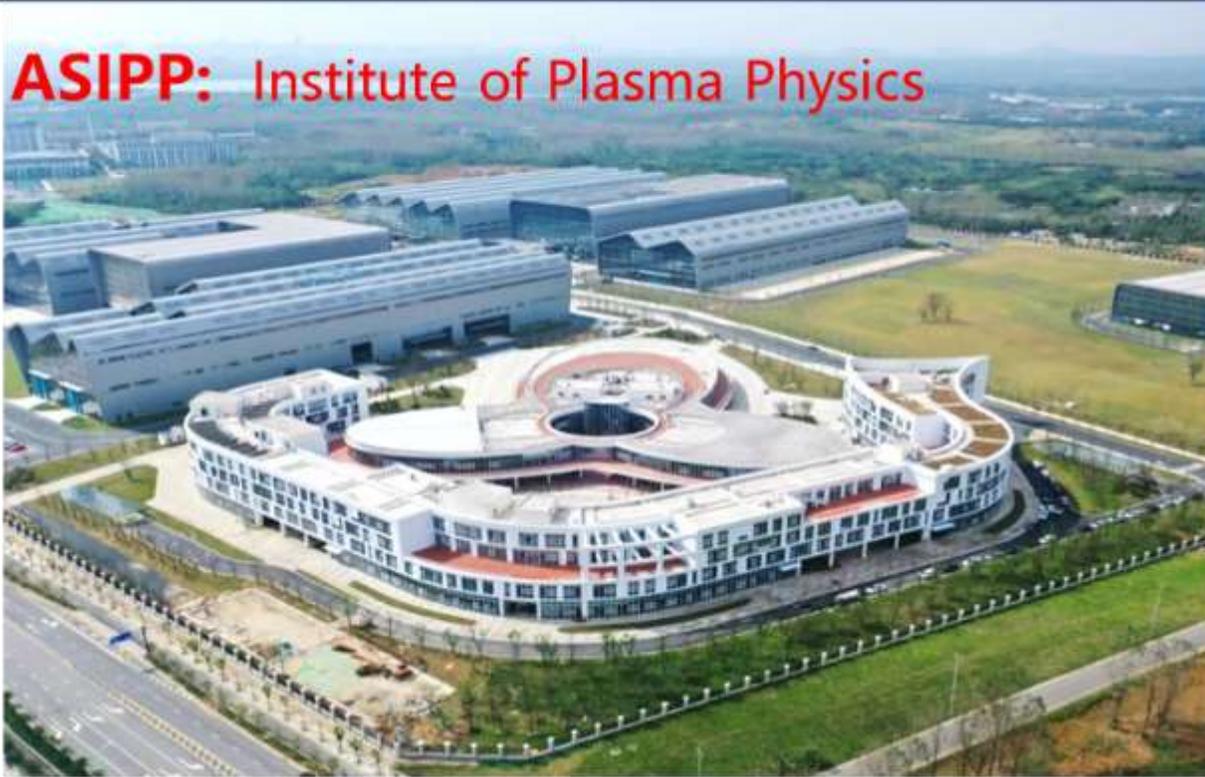
ТРТ



2035

Ключевой структурный элемент федерального проекта –
– токамак с реакторными технологиями (ТРТ)

ASIPP: Institute of Plasma Physics



CRAFT: Comprehensive Research Facility for Fusion Technology

Отработка 19 технологий УТС для EAST, BEST, CFETR

Chinese Academy of Sciences, Hefei



Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak (BEST)

Стройка кампуса стартовала 30 июня 2023 г.
Пуск токамака – в 2027 г.

Термоядерные программы стран ИТЭР в сравнении



РОСАТОМ

Страна	Действ. токамаки	Особенность	Проект	Особенность	Срок ввода
<u>КНР</u>	EAST	Nb ₃ Sn, DD, R=1.7 м, >1000 с	CFETR BEST	Nb ₃ Sn+ВТСП, DT, R=7.2 м, W=1 ГВт, >1000 с Nb ₃ Sn, DT, R=3.6 м, W=200 МВт, >100 с	2035 2028
ЕС	WEST ASDEX	NbTi, DD, R=2,5 м, >1000 с Cu, H/DD R=1.65, 2сек	EU-DEMO DTT	Nb ₃ Sn DT, R=9.2 м, W=1500 МВт, >1000 с Nb ₃ Sn DD, R=2.15 м, W=40 МВт, >100 с	204X 2027
Индия					
Япония	JT-60SA	NbTi, DD, R=2.96 м >100сек	JA-DEMO	Nb ₃ Sn DT, R=8 м, W=1200 МВт	204X
Корея	KSTAR	Nb ₃ Sn DD R=1.8 м >300с	KO-DEMO	Nb ₃ Sn DT, R=8 м, W=1000 МВт	204X
Россия	Глобус-М2, Т-11М Т-15МД	Cu H/DD малые 0.2 с Cu H/DD R=1.48 м ~ 10 с	TRT	ВТСП DD/DT, R=2.15 м, W=40 МВт, >100 с	2035
США	D-IIID NSTX	Cu DD R=1.67 < 5 с R=0.85	SPARC	ВТСП DT, R=1.65 м, W=50 МВт, 10 сек	2027

В соответствии с Соглашением по ИТЭР, все страны-участницы имеют право на получение безвозмездных лицензий **на все** технологии и разработки, созданные в рамках Проекта ИТЭР, **для внедрения в рамках внутренней (национальных) программ УТС**

Хронология формирования национальной программы УТС



РОСАТОМ

2016

2018

2019

2020

2021

2024

2024

2025

2030

2036

Во исполнение указания Президента РФ от 21 января 2016 г. № Пр-104 о разработке и реализации национальной программы развития управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий Госкорпорацией "Росатом" совместно с НИЦ "Курчатовский институт", а также с организациями Российской академии наук разработан **проект Национальной программы развития управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий на период до 2035 года.**

Основные положения национальной программы УТС стали основой для **формирования федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий»** в структуре комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (РТТН)

Реализация федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» (ФП УЗ) в структуре комплексной программы РТТН в соответствии с Указом Президента РФ от 16 апреля 2020 г. № 270. Указом Президента РФ от 14 апреля 2022 г. № 202 комплексная программа РТТН продлена до 2030 года.

Во исполнение Указа Президента РФ от 7 мая 2024 г. № 309 Минэнерго России, Минпромторгом России, ГК «Росатом» и НИЦ «Курчатовский институт» в 2024 году **сформирован национальный проект технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии»** со сроком реализации 2025-2030 годы. Входящий в РТТН ФП УЗ был преобразован в **федеральный проект «Технологии термоядерной энергетики» (ФП РЗ)** и вошел в новый национальный проект. В 2025 году началась его реализация.

Федеральный проект УЗ «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в рамках РТТН и федеральный проект РЗ «Технологии термоядерной энергетики» в рамках национального проекта «Атом» имеют схожие структуры

10 результатов (мероприятий)

5 результатов КВЛ выполняются.
(1 КВЛ завершен, + 3 планируются)

5 результатов НИОКР

3 государственных заказчика



РОСАТОМ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Национальный
исследовательский центр
«Курчатовский институт»

5 направлений исследований и разработок

- Разработка и имплементация базовых термоядерных технологий
- Исследования и разработки по гибридным реакторным технологиям и системам
- Разработка инновационных плазменных технологий, в том числе опытно-промышленных
- Разработки и исследования в области лазерного термоядерного синтеза и лазерных технологий
- Разработка нормативной базы термоядерных и гибридных систем, обеспечение лицензионной деятельности, обмен научно-технической информацией

Осуществлены мероприятия, направленные на строительство уникального токамака с реакторными технологиями и стендовой базы для него, а также плазменных систем исследовательского и технологического назначений

Структура федерального проекта РЗ «Технологии термоядерной энергетики» (преимущество от федерального проекта УЗ КП РТТН)



РОСАТОМ

Ключевые результаты УЗ «Термоядерные и плазменные технологии» КП РТТН 2021-2024 гг

Базовые термоядерные технологии: <ul style="list-style-type: none">Литиевая технология первой стенкиИнфраструктура (1 этап) и проект ТРТВывод Т-15 МД на режимы работы (1 этап)Разработка систем нагрева для УТС	Гибридные системы: <ul style="list-style-type: none">Концепция гибридной реакторной установкиЭлементы системы топливной пеллет-инжекцииПроект бланкета гибридной реакторной установки	Инновационные плазменные технологии: <ul style="list-style-type: none">Прототипы плазменных ракетных двигателейТехнологии обработки материалов и изготовления алмазовИсточники нейтронов (без стенда), ионов и излучений	Технологии лазерного УТС: <ul style="list-style-type: none">НИОКР в обеспечение создания элементов лазерного комплексаЭлементы 8-канального усилителя лазера накачкиМакет и проект модуля драйвера ЛТС	Нормативная база: <ul style="list-style-type: none">Система информационного и проектного обмена (в т.ч. удаленный доступ к установкам)Основа нормативной базы для термоядерных и гибридных систем
--	--	---	---	---

Общий объем финансирования на 2021-2024 годы: 54,2 млрд. руб., в том числе 43,8 млрд. руб. ФБ, 10,4 млрд. руб. ВНБ источники

Ключевые результаты РЗ «Технологии термоядерной энергетики» НПЛ НАиЭТ 2025-2030 гг

Базовые термоядерные технологии: <ul style="list-style-type: none">Технологии для ТРТ, включая ЭМС из ВТСП (стендовая база и НИОКР). Инфраструктура и ключевые узлы ТРТВывод Т-15 МД на режимы работы (3 этап)Разработка систем нагрева для ТРТ	Гибридные системы: <ul style="list-style-type: none">Технический проект ТИН для гибридной реакторной установкиПроект бланкета для гибридной реакторной установки	Инновационные плазменные технологии: <ul style="list-style-type: none">Летные прототипы плазменных ракетных двигателейТехнологии обработки материалов и изготовления алмазовИсточники нейтронов (включая стенд), ионов и излучений	Технологии лазерного УТС (2025 г): <ul style="list-style-type: none">2 канала для 8-канального усилителя лазера накачкиОбразец модуля драйвера ЛТС	Нормативная база: <ul style="list-style-type: none">Система информационного и проектного обмена: расширение и новые участники (ТРТ)Полная нормативной база для термоядерных и гибридных систем + система лицензирования
--	--	---	--	---

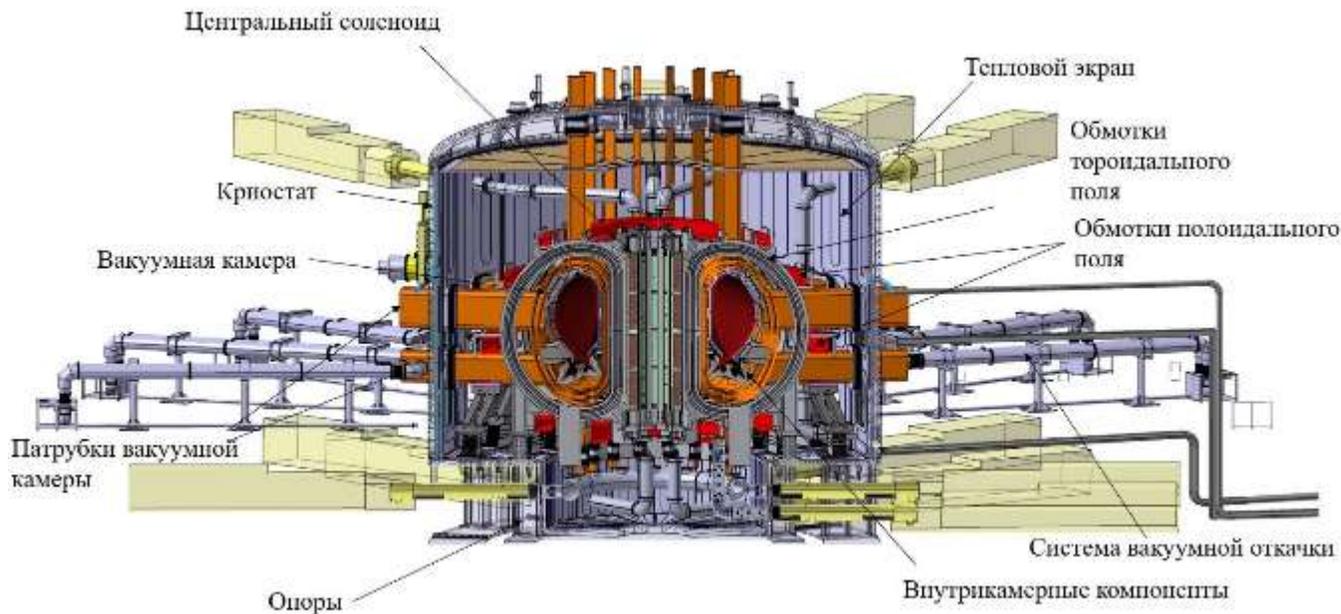
Целевой сценарий финансирования на 2025-2030 годы: 198,9 млрд. руб., в том числе 181,6 млрд. руб. ФБ, 17,3 млрд. руб. ВНБ

Ключевые параметры установки ТРТ:

- максимальный ток плазмы: **5 МА**
- длительность разряда: **100 с (DD)**
- температура плазмы: **8 кэВ**
- выход нейтронов: **$0.5 \cdot 10^{18}$ н/с (DD)**
- межрегламентный интервал работы установки: **1000 циклов**
- напряженность магнитного поля: **8 Тл (ВТСП ЭМС)**
- значение тока, поддерживаемого безындукционно: **3 МА**

14 крупных наукоемких систем:

- Вакуумная камера, криостат, экраны
- Компоненты, обращенные к плазме
- Электромагнитная система удержания плазмы
- Система электропитания ЭМС (DC-часть)
- Система тиристорно-выпрямительных агрегатов питания ЭМС
- Система дополнительного нагрева плазмы
- Система управления плазмой
- Комплекс топливоподачи, вакуумной откачки и выделения топливной смеси
- Система диагностик
- Система криогенного обеспечения
- Система водяного охлаждения
- Автоматизированная информационно-управляющая система
- Система роботизированного обслуживания
- Информационная инфраструктура управления проектированием

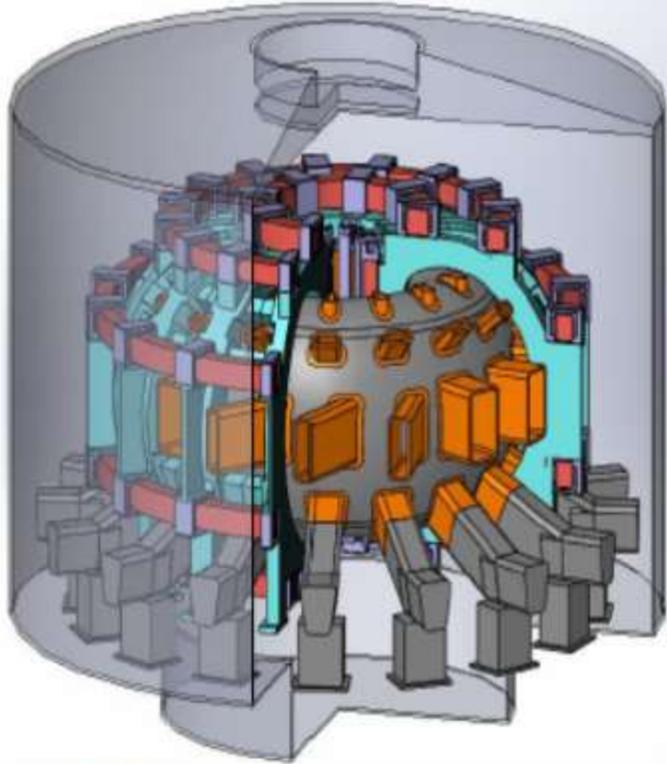


ТРТ – инновационный шаг России к термоядерной энергетике



РОСАТОМ

На базе и в развитие ИТЭРа



2021 – 2022 разработан концептуальный проект (опубликован в специальных номерах журнала «Физика плазмы»: № 11, 12 в 2021 г. и № 8, 12 в 2022 г.)

2023 – 2024 разработан эскизный проект; созданы элементы инфраструктуры и базовых технологических систем

2025 – 2026 выполнен технический проект

2026 – 2034 разработка и изготовление основных систем

 **2030** – контрольная сборка вакуумной камеры

 **2035** – физический пуск

Инновации ТРТ - рывок к технологиям будущего и развитию высокотехнологичного производства сегодня

Инновационная электромагнитная система из ВТСП

Уникальная литиевая защита первой стенки

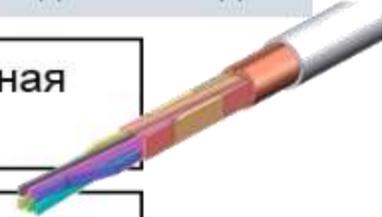
Инновационная система мегаваттных инжекторов

Качающаяся сепаратриса дивертора

Мегаваттные гиротроны с параметрами выше мировых

Инновационные системы ионноциклотронного нагрева и геликонной генерации тока

Технологии гибридного blankets



Сооружение ТРТ это восстановление идеологического и технологического лидерства России в области УТС

Дорожная карта развития УТС в РФ



РОСАТОМ

Главные цели до 2027 года

Вывод на рабочие режимы установки токамак Т-15МД.
Создание конструкторской документации для ТРТ.

Главные цели до 2030 года

3-я очередь Т-15МД (25 МВт).
Стендовая база УТС.
Готовность ключевых компонент и систем ТРТ.

Главная цель до 2035 года

Пуск токамака ТРТ – установки мирового уровня

- Литиевая защита первой стенки и дивертора
- ВТСП электро-магнитная система
- Системы создания плазмы и подпитки веществом
- Мощные системы дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока (ВЧ, СВЧ, НИ)
- Технологии blankets (в том числе для будущей ГРУ)
- Передовые диагностические комплексы

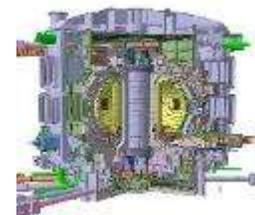
Новые технологии УТС

Токамак с реакторными технологиями ТРТ



Технологии ИТЭР

ИТЭР



Технологии и апробация

Т-15 МД



Заглянем в будущее термояда!



- Нулевой рециклинг
- Сокращение и упрощение инженерных систем
- Оптимизация конфигурации
- Отказ от теплового цикла



- Компактность
- Квазистационарность
- Сверхпроводники
- Низкая энергетика
- Прямое преобразование энергии



- *Гофрированный тор*
- *Сверхпроводящий диполь*

Гофрированный тор

Ловушка с замкнутыми силовыми линиями и модулированной кривизной

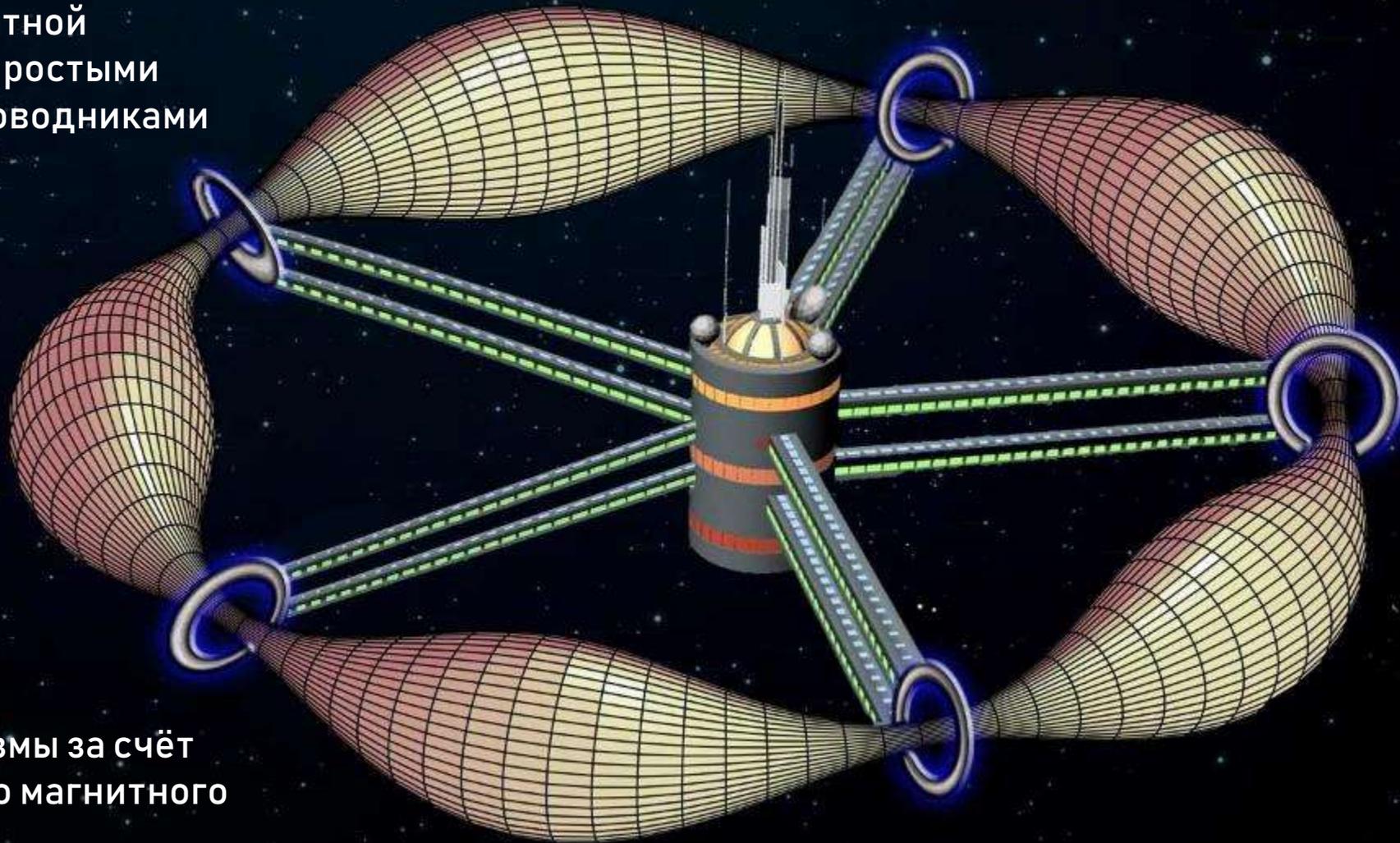


РОСАТОМ

Создание магнитной конфигурации простыми кольцевыми проводниками

Равновесие – без тороидального тока

Стабилизация плазмы за счёт минимума среднего магнитного поля на оси



Недостаток – пока существует только в теории

Токовое кольцо – магнитный диполь

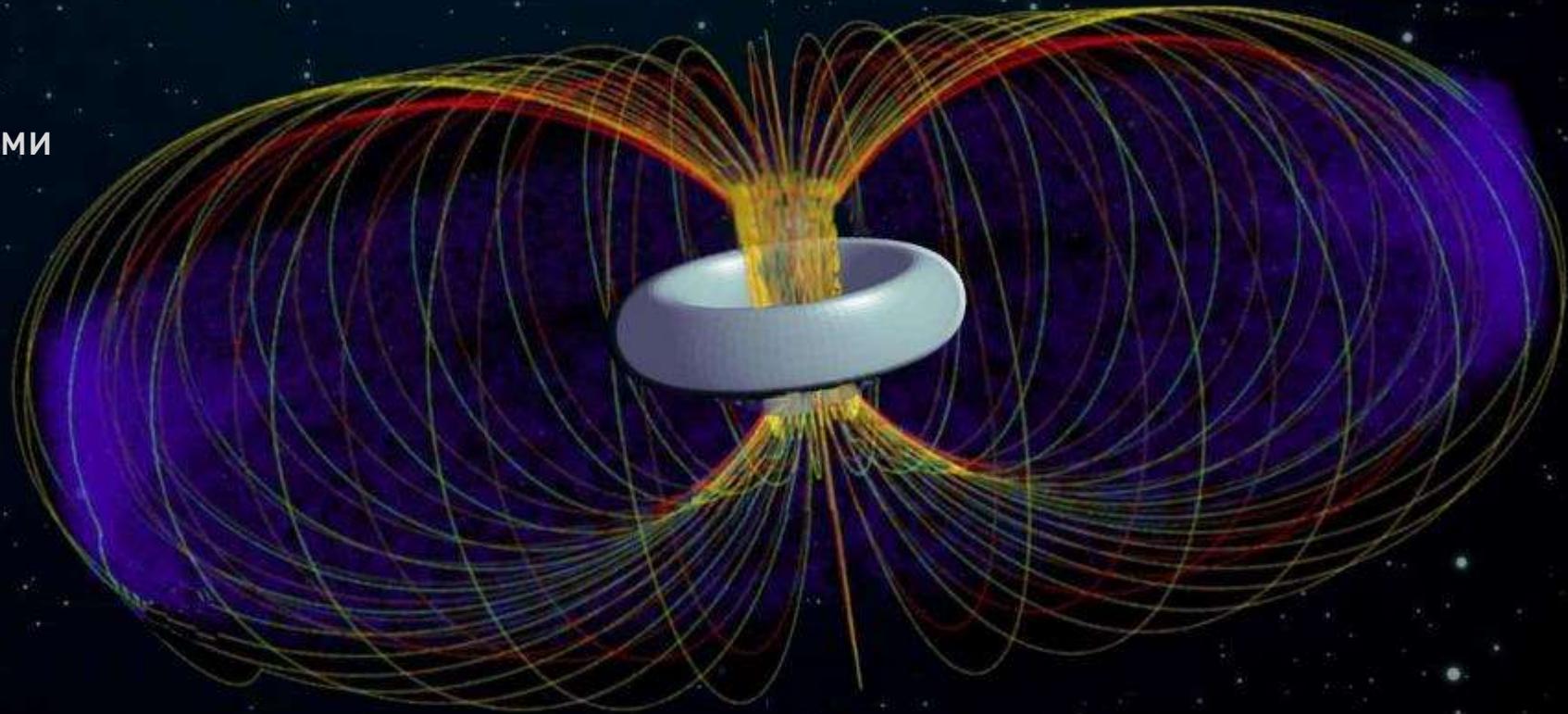


РОСАТОМ

Простейшая
магнитная
конфигурация с
замкнутыми силовыми
линиями

Простейшая
токовая система

Простота
масштабирования



Равновесие и устойчивость экспериментально проверены



Спасибо за внимание!