

Энергетика и экология. Термоядерная энергетика.

Поступаев Владимир Валерьевич

Кафедра физики плазмы НГУ

ИЯФ СО РАН, 329-42-74, V.V.Postupaev@inp.nsk.su



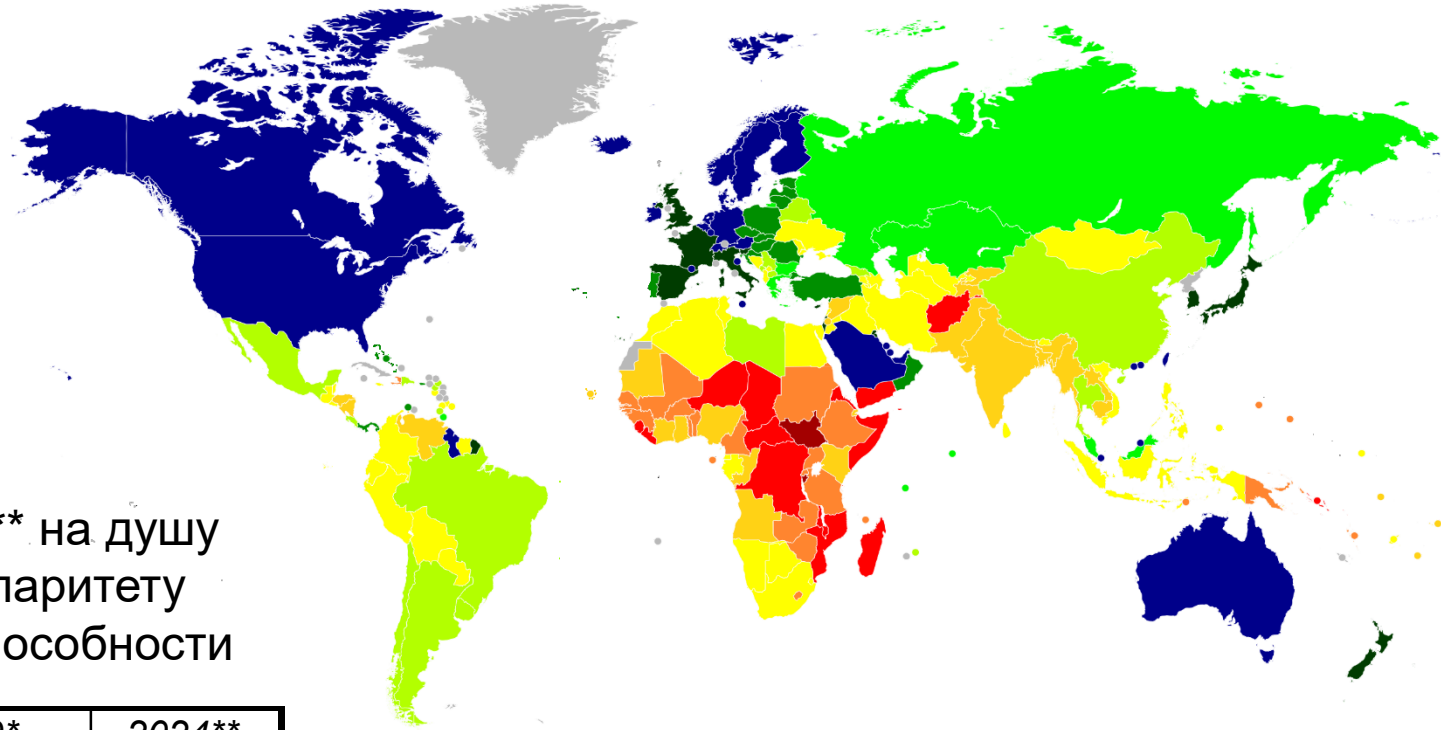
План лекции

- **Энергетика и экология. Изменение климата.**
- Альтернативная энергетика.
- Управляемый термоядерный синтез.
- Плазма как четвёртое состояние вещества.
- Состояние термоядерных исследований в мире.

Уровень жизни в разных странах

Долларов США*** на душу населения, по паритету покупательной способности

страна	2019*	2024**
Люксембург	112 875	151 146
США	63 051	86 601
Германия	53 571	70 930
Испания	38 143	55 089
Россия	27 394	47 299
Китай	17 206	26 310
Украина	12 710	19 603
Индия	6 284	11 112
Таджикистан	3 560	5 533
Юж. Судан	?	763



Countries or territories by GDP (PPP) per capita in 2022.



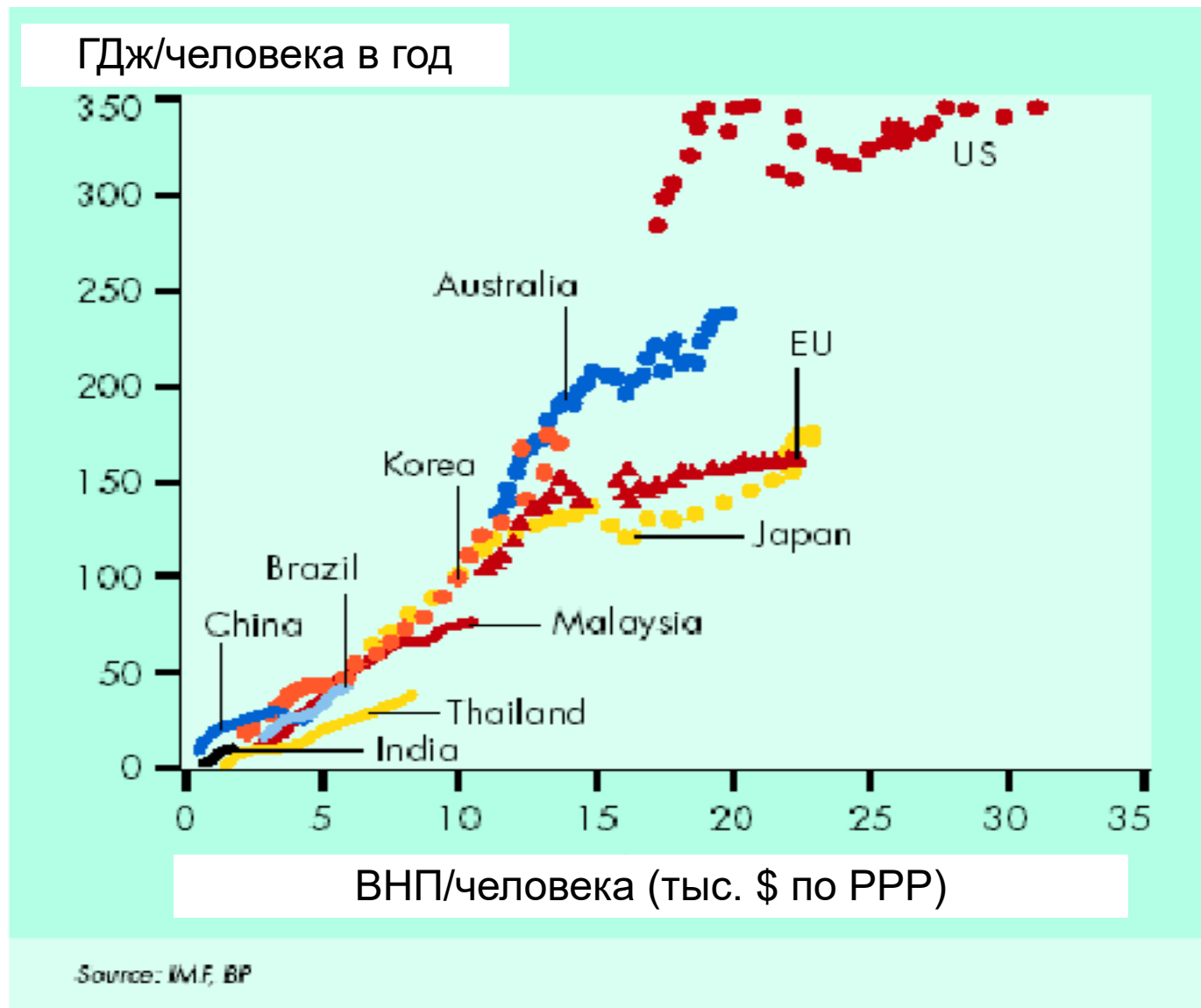
World Economic Outlook Database
International Monetary Fund,

* октябрь 2020

** прогноз, октябрь 2024

*** 22,7% USD inflation 2019-2024 (4,08% в среднем)

Зависимость ВВП от энергетики



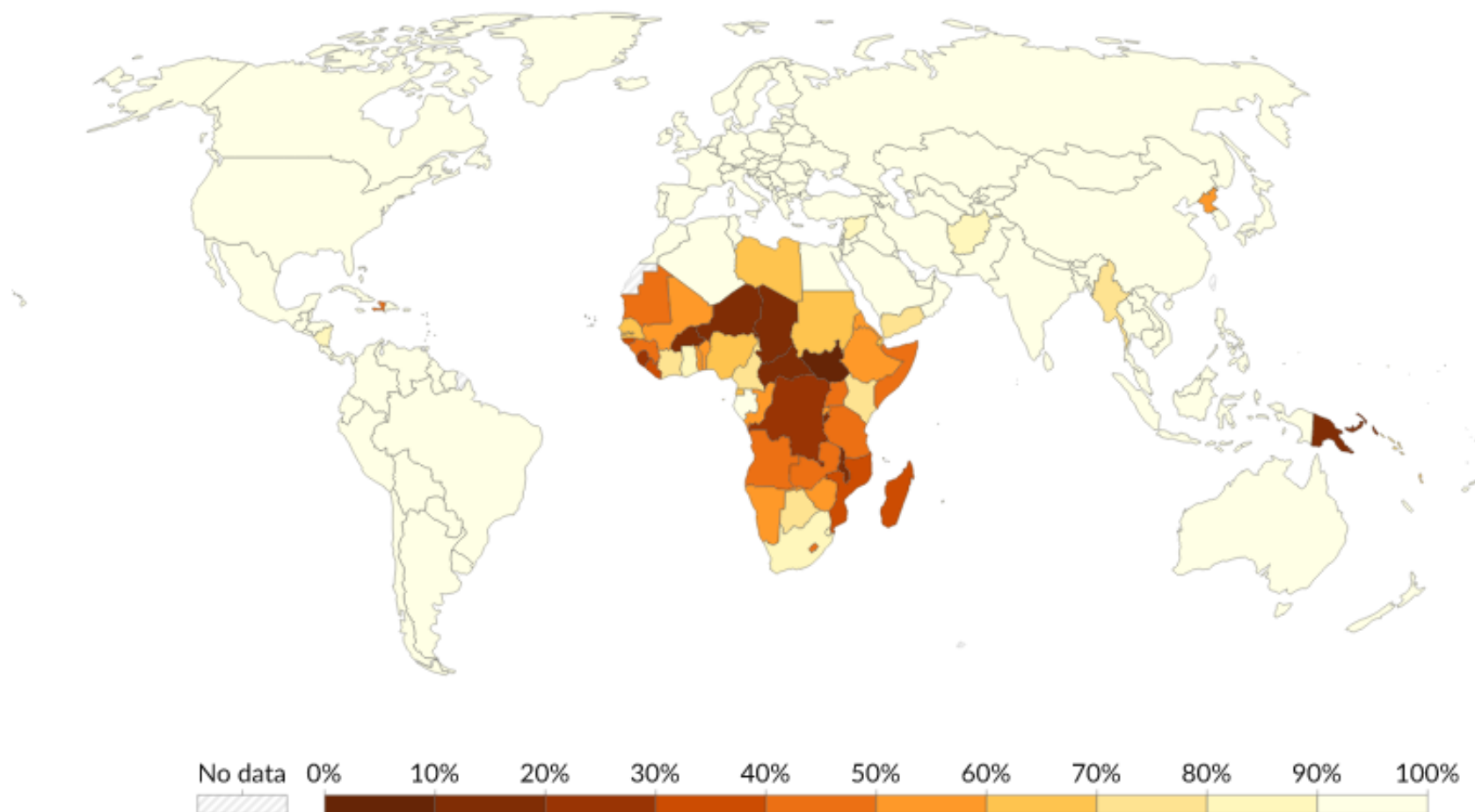
Задача: устойчивое развитие, нельзя жить рядом с голодным соседом!

Люди без доступа к электричеству

Share of the population with access to electricity, 2022

Our World
in Data

Having access to electricity is defined in international statistics as having an electricity source that can provide very basic lighting, and charge a phone or power a radio for 4 hours per day.



Источники энергии

- **Ископаемое топливо**

(нефть, газ, каменный и бурый уголь, торф, сланцы, таровый песок...)

- **Альтернативные, не нарушающие тепловой баланс**

- Сжигание биомассы
- Гидроэнергетика
- Солнечная энергетика (фотоэлектроника или тепловые устройства)
- Использование энергии ветра
- Экзотика (геотермальная, приливы)

- **Альтернативные, нарушающие тепловой баланс**

- Ядерная энергетика
- Солнечная энергетика в космосе (передача на Землю)
- Управляемый термоядерный синтез

Необходимо различать задачи, для которых развивается энергетика (локальные или глобальные). Для крупномасштабной энергетики обязательным условием является бесперебойность снабжения и гарантированность параметров питающей сети.

Есть также ресурсные, политические и социальные ограничения.

Структура первичной энергии

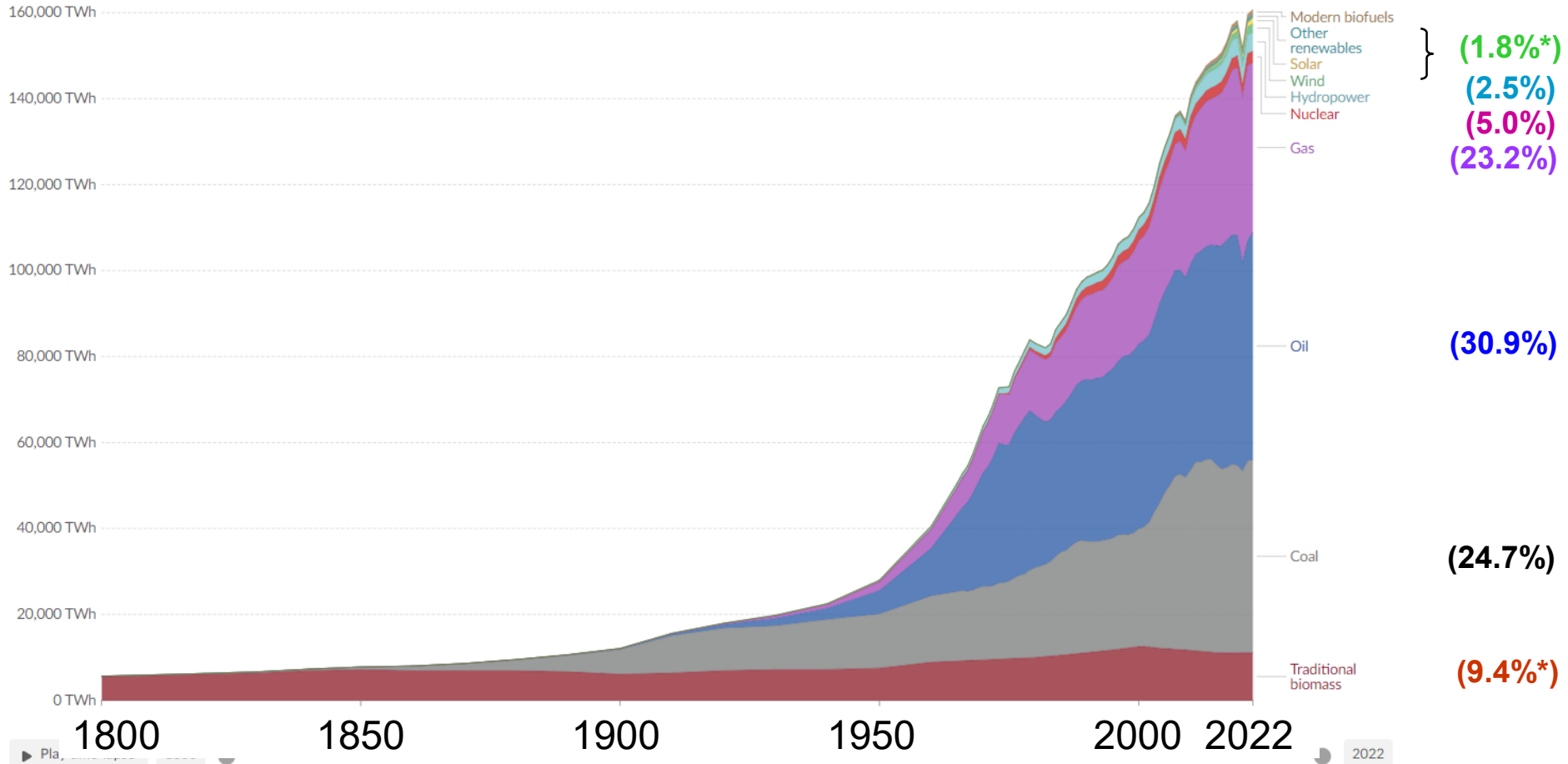
Global direct primary energy consumption

Energy consumption is measured in terawatt-hours, in terms of direct primary energy. This means that fossil fuels include the energy lost due to inefficiencies in energy production.

Our World in Data

Settings

Table Chart



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023); Smil (2017) – [Learn more about this data](#)

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

OurWorldInData.org/energy | CC BY

Download

Share

Exit full-screen

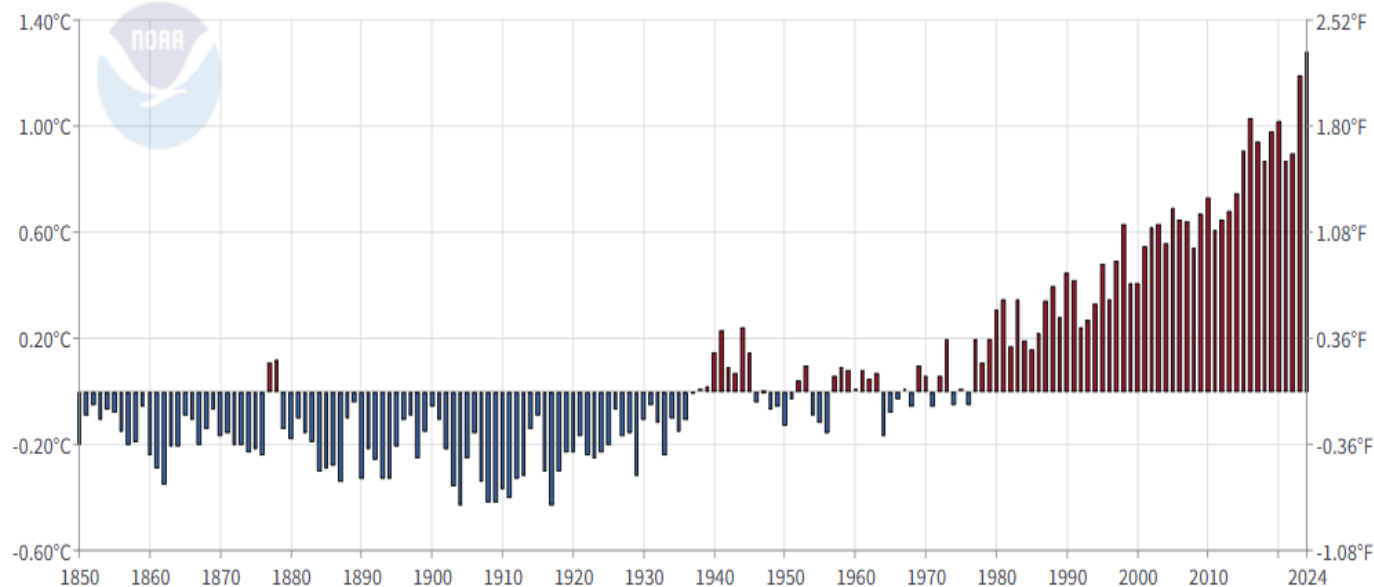
Key world energy statistics, IEA, 2021 (статистика за 2019 год)

Изменение глобальной температуры

Global Land and Ocean Average Temperature Anomalies

January-December

по отношению к средней температуре за XX век



«Горячая десятка»

(за всю историю человека)

Anomaly, °C

2024	1.29
2023	1.19
2016	1.03
2020	1.02
2019	0.98
2015	0.94
2017	0.91
2022	0.90
2018	0.87
2021	0.87

<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/>

Измерение глобальной температуры само по себе не является достаточным основанием для выводов о глобальном потеплении, поскольку существуют природные температурные циклы разной длительности.

Дополнительно к метеорологическим данным нужно рассматривать данные других измерений и результаты компьютерного моделирования атмосферных процессов.

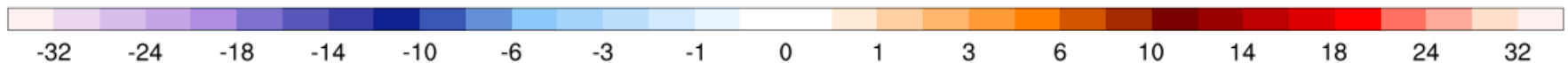
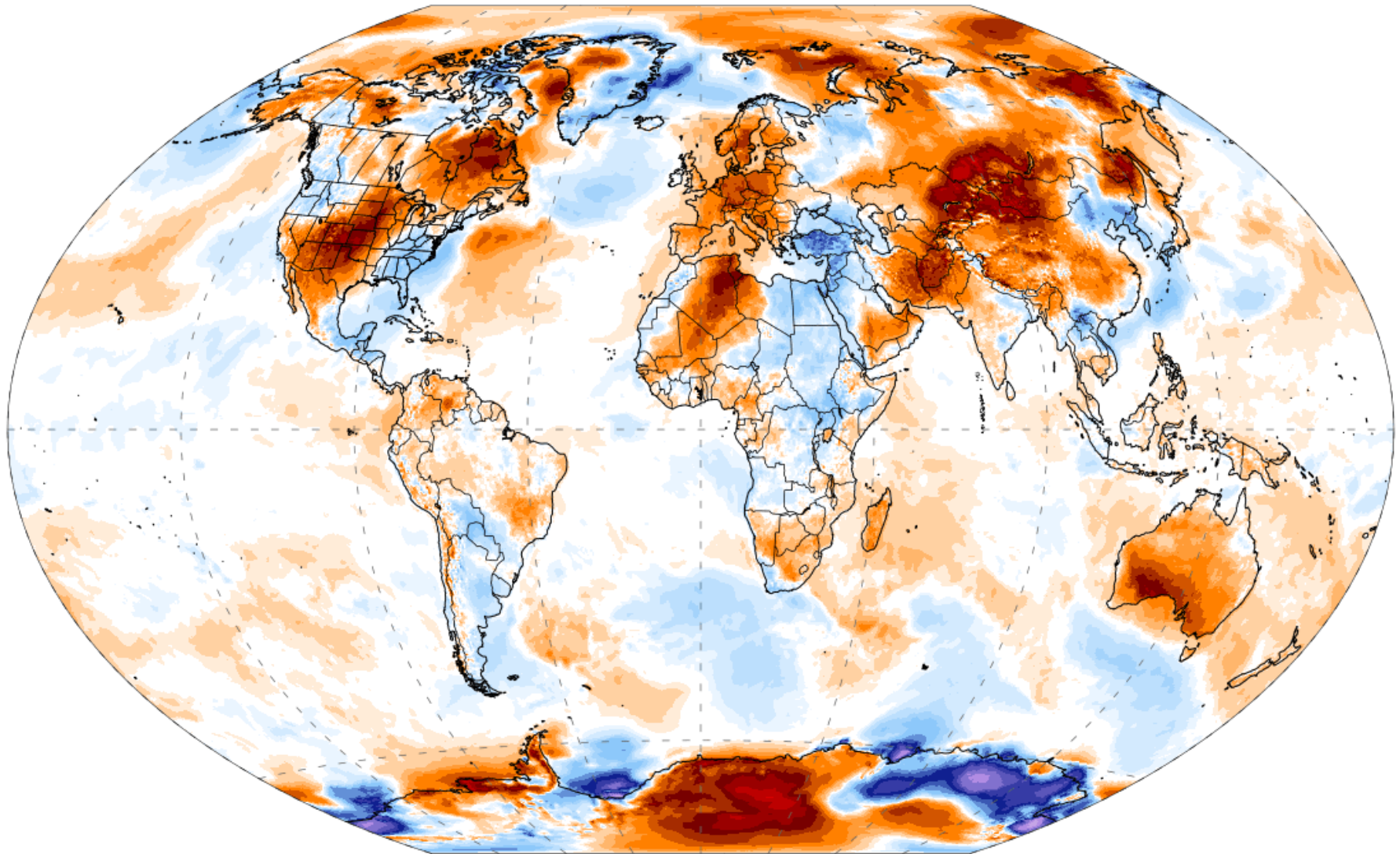
Локальные температурные аномалии

GFS 2m T Anomaly (°C) [CFSR 1979-2000 baseline]

1-day Avg | Sun, Apr 13, 2025

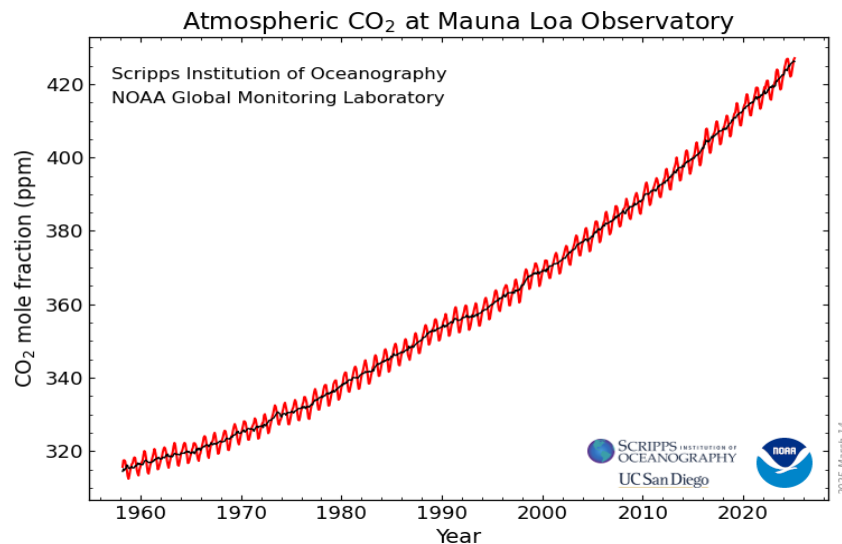
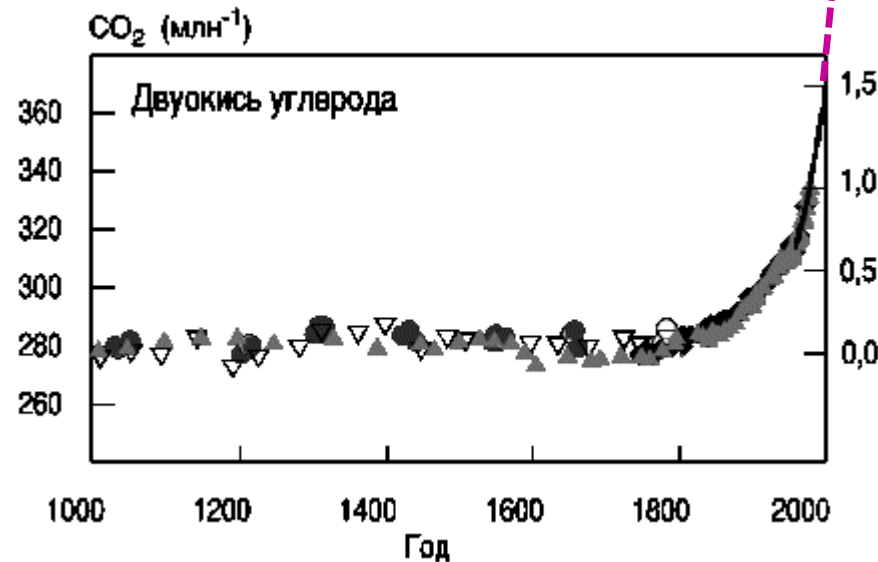
ClimateReanalyzer.org

Climate Change Institute | University of Maine



Изменение состава атмосферы

Mauna Loa, 12.04.2025: 430.36 ppm



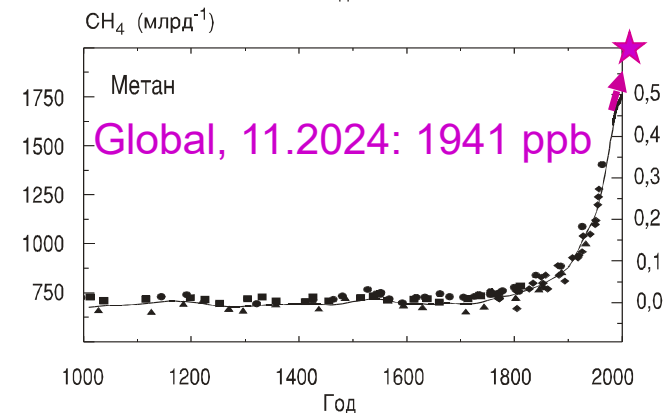
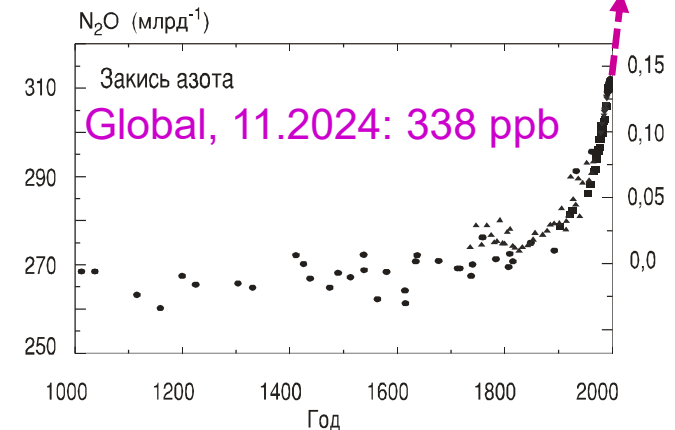
МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ГРУППА ЭКСПЕРТОВ
ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА



Резюме для лиц, определяющих политику

Показатели влияния действий человека на атмосферу

1990



Левая ось - концентрация в атмосфере

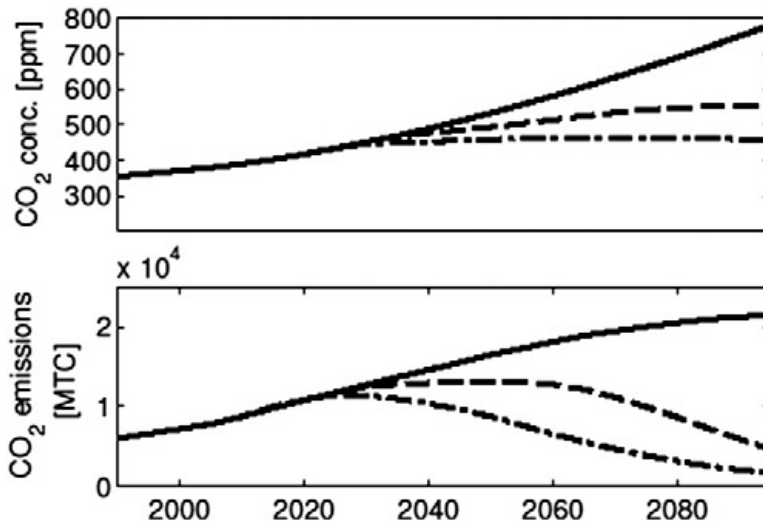
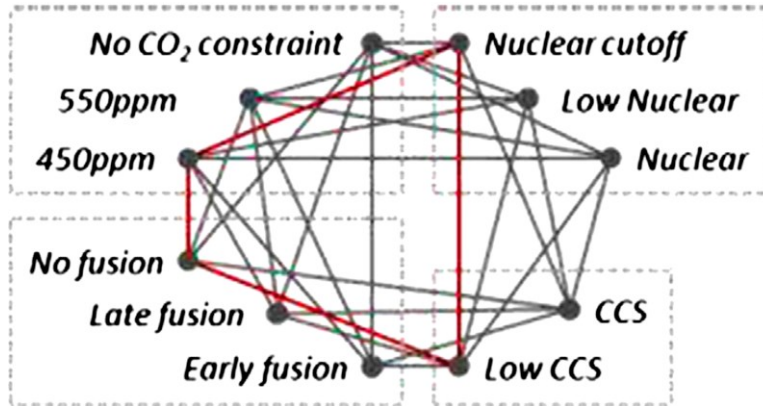
Правая ось - дополнительное
тепловое воздействие, Вт/кв.м

План лекции

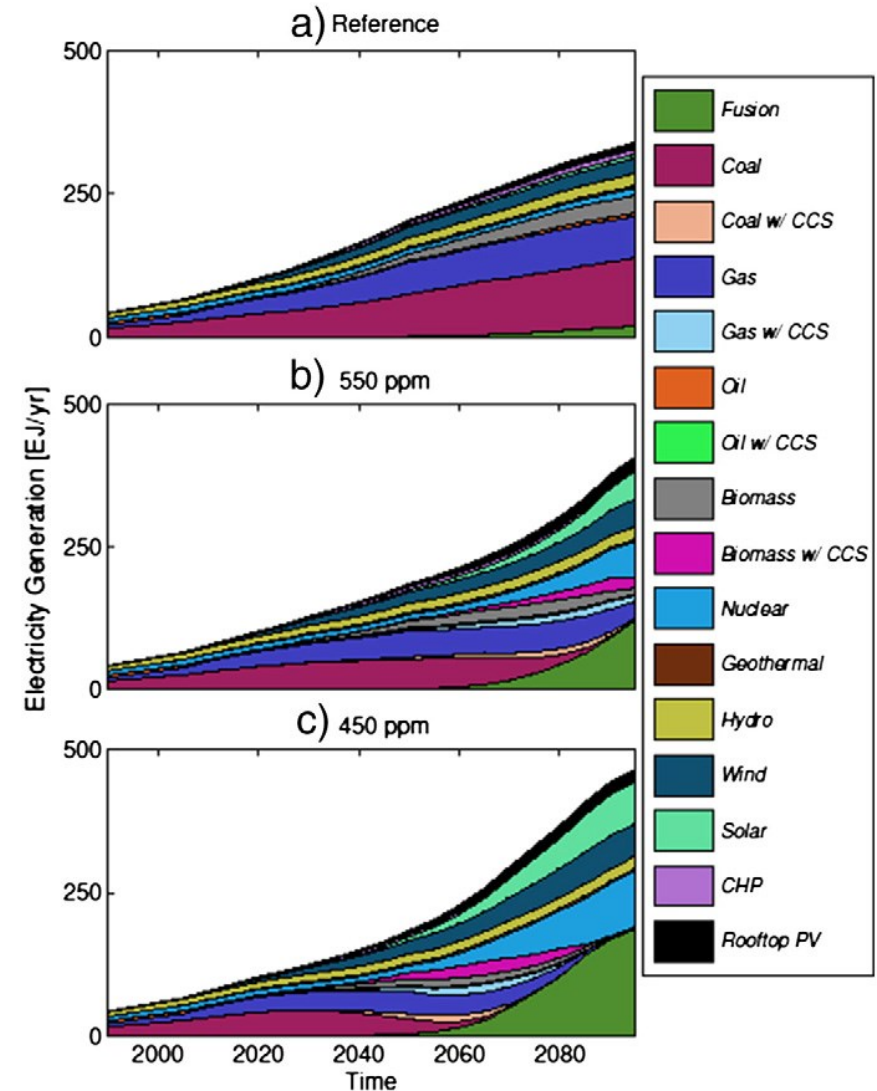
- Энергетика и экология. Изменение климата.
- **Альтернативная энергетика.**
- Управляемый термоядерный синтез.
- Плазма как четвёртое состояние вещества.
- Состояние термоядерных исследований в мире.

Сценарии развития энергетики

Options for scenario assumptions

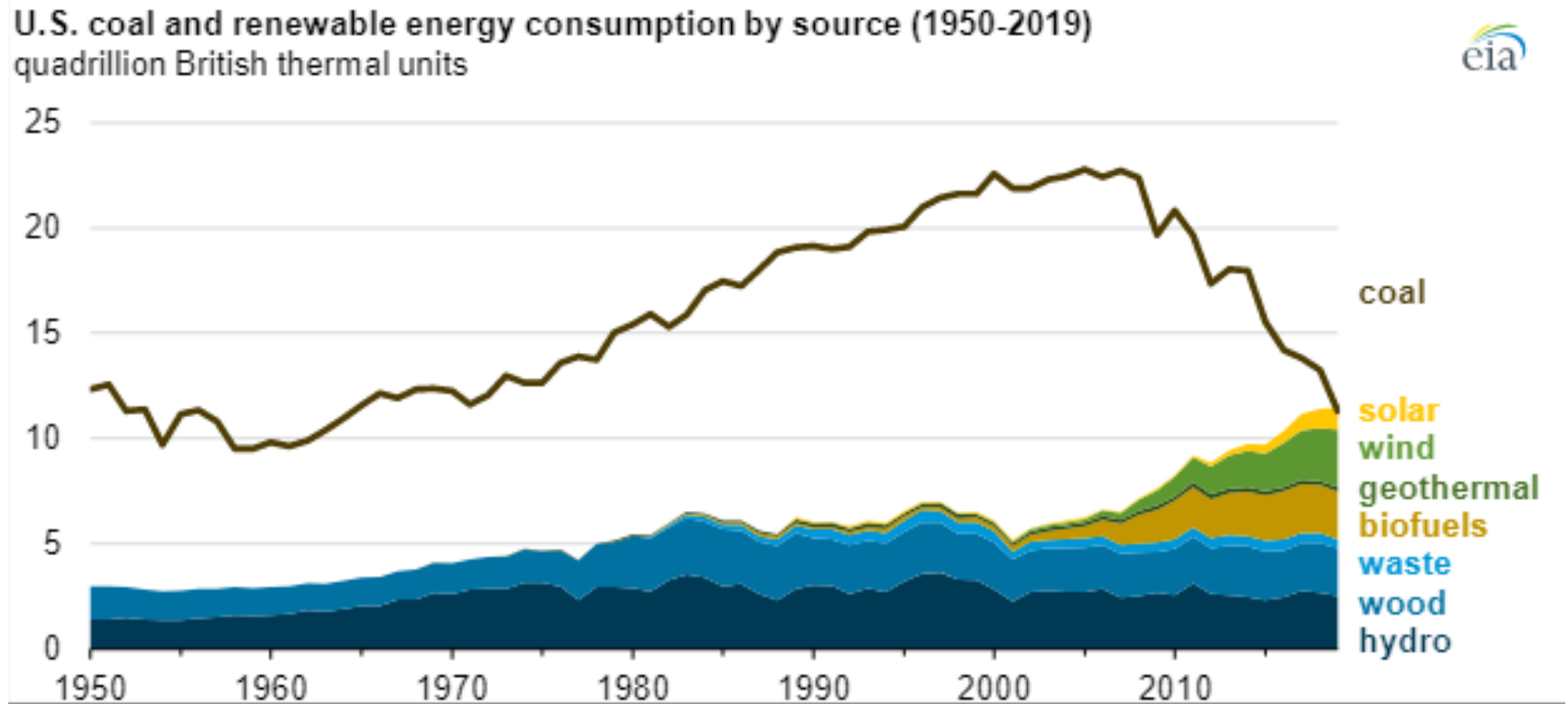


CO₂ concentrations and emissions for baseline, 450 ppm, and 550 ppm scenarios



Impact of carbon constraints on fusion deployment for low nuclear, low CCS, 2035 introduction: a) Reference case; b) 550 ppm case; c) 450 ppm case

Возобновляемая энергия в США



<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=43895>

Проблемы несбалансированной энергосистемы с большой долей ветровой и солнечной энергии:

штат Техас, массовые отключения с 11 по 20 февраля 2021 г. из-за трёх сильных снегопадов

- более 4,5 млн. человек оставались без электричества до нескольких дней;
- около 12 млн. человек остались без водопровода (перемерзли трубы из-за отсутствия циркуляции);
- оценка смертей от переохлаждения: 111 человек;
- оценка экономического ущерба: \$195.6 млрд.

https://en.wikipedia.org/wiki/2021_Texas_power_crisis

Солнечная энергетика - фотовольтаика

David MacKay. Sustainable energy - without the hot air // www.withouthotair.com



Bavaria Solar Park: 5 W/m^2 ; this picture shows 0.7 MW (average)

Низкая плотность энергии: альтернативные системы трудно интегрировать в большую энергетику

Солнечная энергетика – тепловые станции



станция PS20 около Севильи, Испания, с 2009 г., 20 МВт
1255 зеркал по 120 кв.м., башня с парогенератором высотой 165 м

Ветер на суше и на море

- для 2 МВт: диаметр ротора ~90 м, высота башни ~150 м.
- на суше мест с постоянно сильным и ровным ветром мало.
- строительство на прибрежном шельфе $\Rightarrow$ проблемы с экологами, рыбаками и курортным бизнесом.
- проблема захоронения отработанных лопастей (углепластик).



Источники загрязнения и энергозатраты

Всю экологическую нагрузку энергетики можно свести к двум вещам: стоимости электроэнергии и полным выбросам парниковых газов (включая добычу и перевозку топлива и рекультивацию земли)



Геотермальная : строительство станции, выбросы из источника



Ветровая: строительство станции (большой размер ветростанций), долгоживущие перерабатываемые отходы



Солнечная: производство фотоприемников и аккумуляторов, строительство станции



Биомасса: энергия на выращивание, сбор и перевозку, строительство станции, отходы

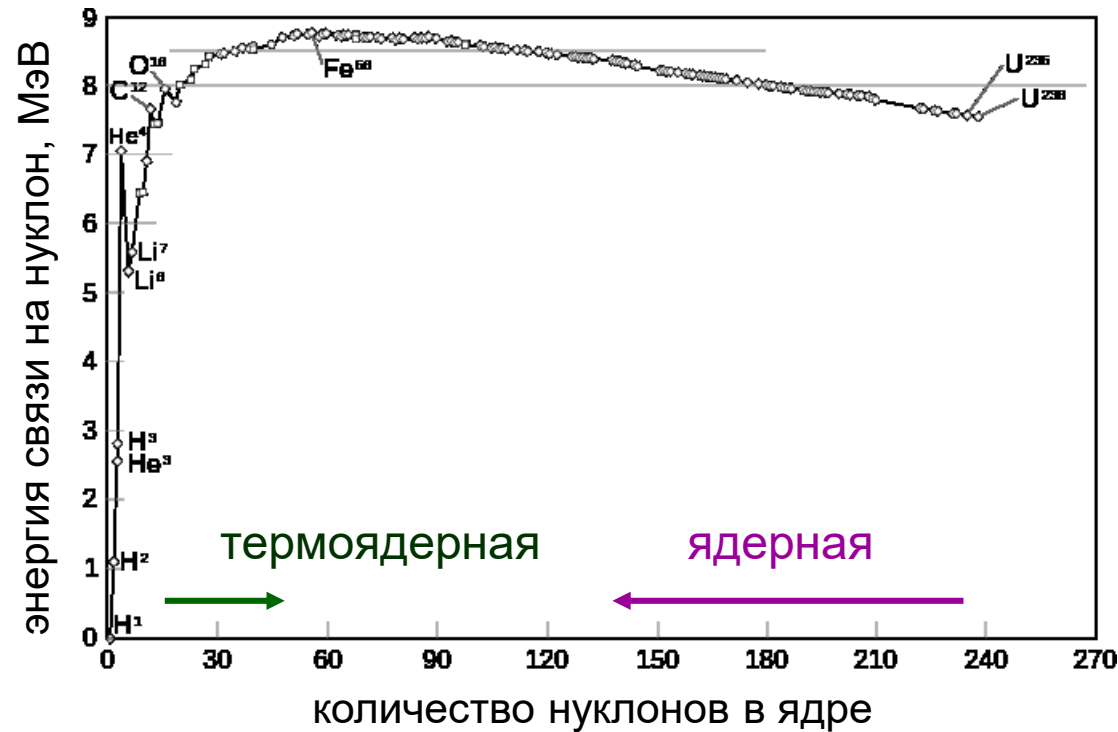
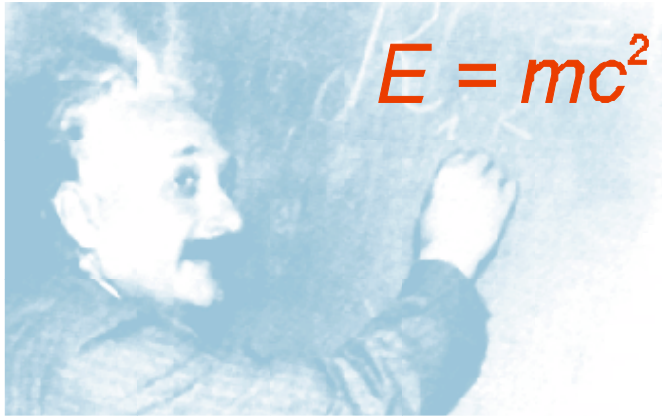


Ядерная: добыча, обогащение, перевозка топлива, строительство станции, переработка и захоронение отходов, эксплуатация



Гидроэнергетика: очистка территории, строительство станции, гниение растительности

Основы ядерной и Т/Я энергетики

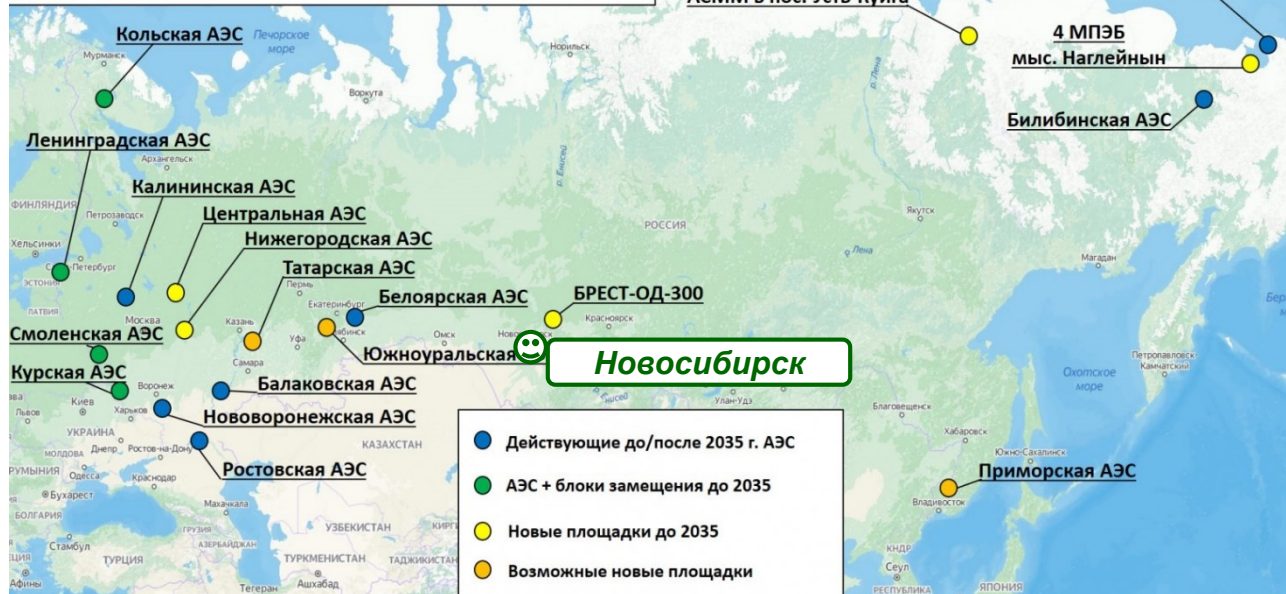


- масса ядра меньше суммы масс p и n
- ядра средней массы имеют наибольшую энергию связи
- ядерные реакции – высвобождение энергии связи
- $^{235}\text{U} \rightarrow X + \dots + 200 \text{ МэВ}$ (0,86 МэВ/нуклон)
- $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + 17,6 \text{ МэВ}$ (3,5 МэВ/нуклон)
- $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 4,2 \text{ эВ}$ (0,2 эВ/нуклон)

Атомная энергетика России

Действующие и планируемые АЭС России
Данные на январь 2022

Составил Дмитрий Горчаков



Статистика работы

Энергоблоков - 37 шт. (28,5 ГВт, 19,1% всей электрогенерации РФ) **КИУМ (2023): 83,91%**

ВВЭР-1200 – 4 шт.

ВВЭР-1000 - 13 шт.

ВВЭР-440 - 5 шт.

РБМК-1000 - 8 шт.

ЭГП-6 - 3 шт.

БН-600 - 1 шт.

БН-800 - 1 шт.

КЛТ-40С – 2 шт.

Строится 2+4+1 энергоблоков

События по шкале INES в 2023:

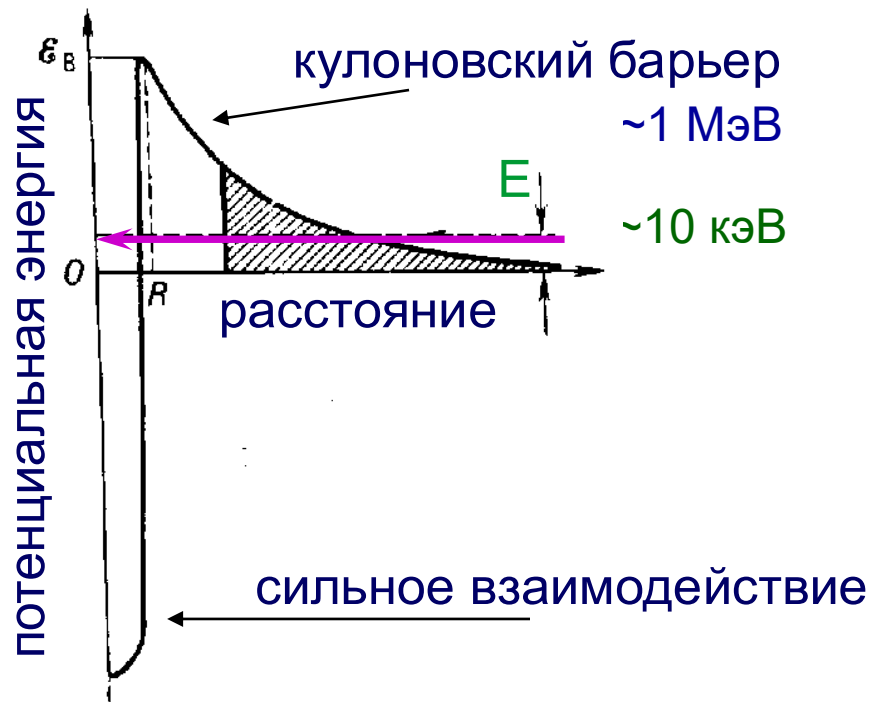
34+8 шт. уровня 0 и ниже; 2 шт. уровня 1
~~событий уровня 1 и выше не было с 1999 г.~~

Автоматические остановки реактора: 15

План лекции

- Энергетика и экология. Изменение климата.
- Альтернативная энергетика.
- **Управляемый термоядерный синтез.**
- Плазма как четвёртое состояние вещества.
- Состояние термоядерных исследований в мире.

Потенциальная энергия взаимодействия



Туннельный эффект

$$D \cong D_0 \exp \left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U(x) - E)} dx \right)$$

- превышение энергии частицы над кулоновским барьером отталкивания (взаимодействие ускоренной частицы с мишенью)
- **подбарьерное проникновение (туннельный эффект) при относительно небольших энергиях (звезды, термоядерная плазма, ядерное оружие)**

Почему именно плазма?

- Сечение Т/Я реакции масштаба размера атомного ядра
 - Сечение ионизации атома масштаба размера электронной оболочки
 - В обычном веществе преобладают ионизационные потери
- **нужно взять уже ионизированное вещество (плазму) !!!**

Условия:

$$T > 10 \text{ кэВ}$$

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3}\cdot\text{с}$$

Чтобы произошла реакция синтеза, частицы должны пройти под кулоновский барьер

Чтобы все частицы прореагировали, нужно удерживать горячую плазму некоторое время (критерий Лоусона)

Критерий Лоусона $n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3}\cdot\text{с}$ (для D-T реакции) выведен из рассмотрения баланса мощностей в термоядерном реакторе, детали физики реактора в ответ не входят → есть разные пути достижения цели

Реакции термоядерной энергетики

Термоядерные реакции - ядерные реакции между легкими атомными ядрами, протекающие при высоких температурах ($>10^7 \div 10^8$ K)

- Реакции с низким порогом по энергии и самым большим сечением
- Первое Т/Я топливо: смесь 50% D (дейтерий) и 50% Т (тритий)
- **D-T** (идёт при наименьшей температуре):

$$D + T \Rightarrow {}^4\text{He} (3,5 \text{ МэВ}) + n (14,1 \text{ МэВ})$$
- **D-D** (два почти равновероятных канала):

$$D + D \Rightarrow T (1,01 \text{ МэВ}) + H (3,02 \text{ МэВ})$$

$$D + D \Rightarrow {}^3\text{He} (0,82 \text{ МэВ}) + n (2,45 \text{ МэВ})$$
- **T-T** :

$$T + T \Rightarrow {}^4\text{He} + 2n (11,3 \text{ МэВ})$$

есть и схемы с пониженным выходом нейтронов:

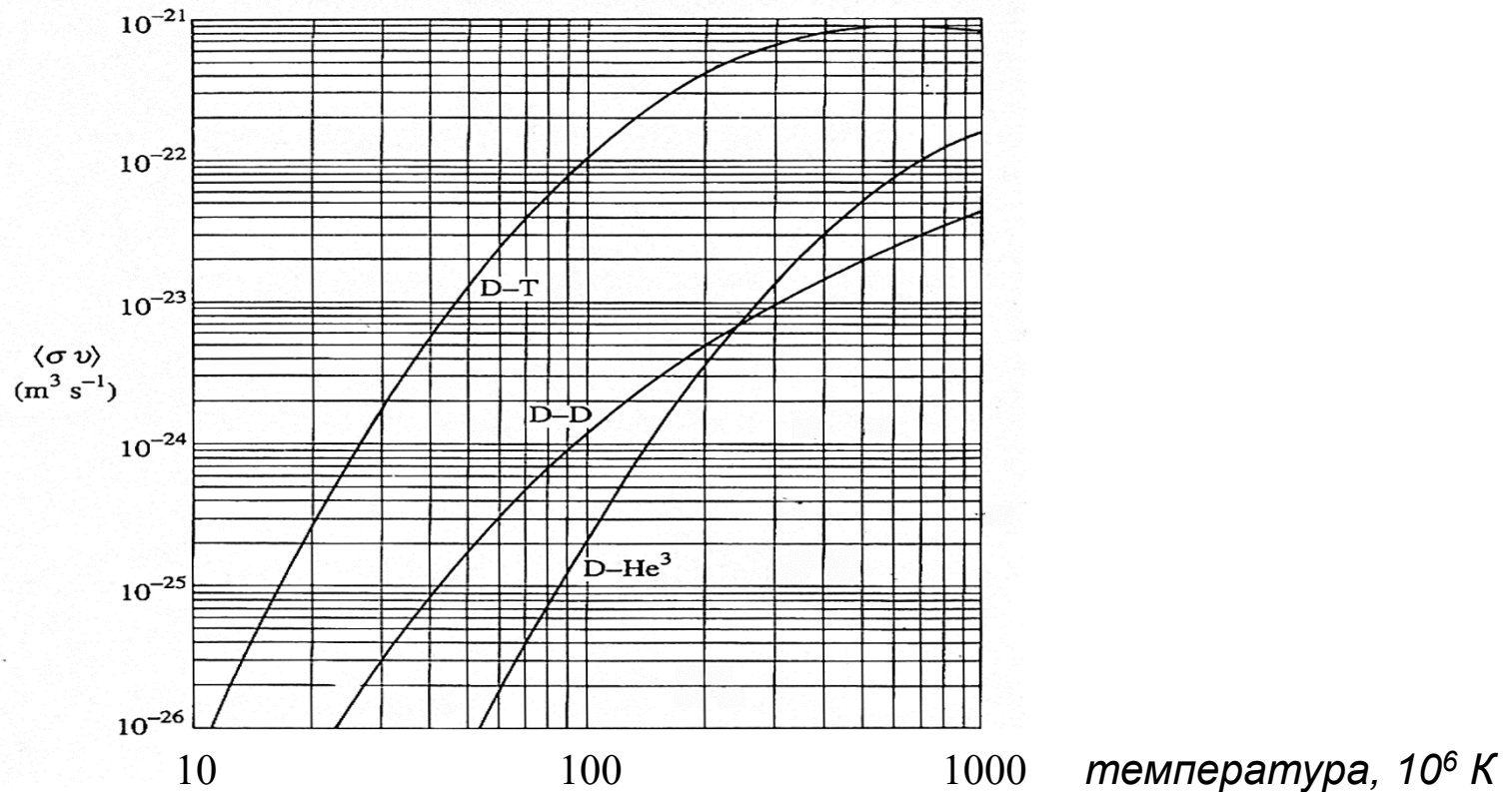
основные реакции $D + {}^3\text{He} \Rightarrow {}^4\text{He} + p$ и $p + {}^{11}\text{B} \Rightarrow 3 \times {}^4\text{He}$

но их труднее реализовать и у каждой из них есть свои проблемы

Эффективность различных реакций

Число реакций в единицу времени определяются не только сечением, но и количеством актов столкновения частиц, т.е. их скоростью.

В плазме – свёртка сечения с функцией распределения.



Мощность D-T реакции при температуре 10^8 K и плотности 10^{14} cm^{-3} составляет **$\sim 1 \text{ Вт/см}^3$**

План лекции

- Энергетика и экология. Изменение климата.
- Альтернативная энергетика.
- Ядерная энергетика.
- Управляемый термоядерный синтез.
- **Плазма как четвёртое состояние вещества.**
- Состояние термоядерных исследований в мире.

Что такое плазма?

Плазма – это квазинейтральная среда, состоящая из заряженных и нейтральных частиц

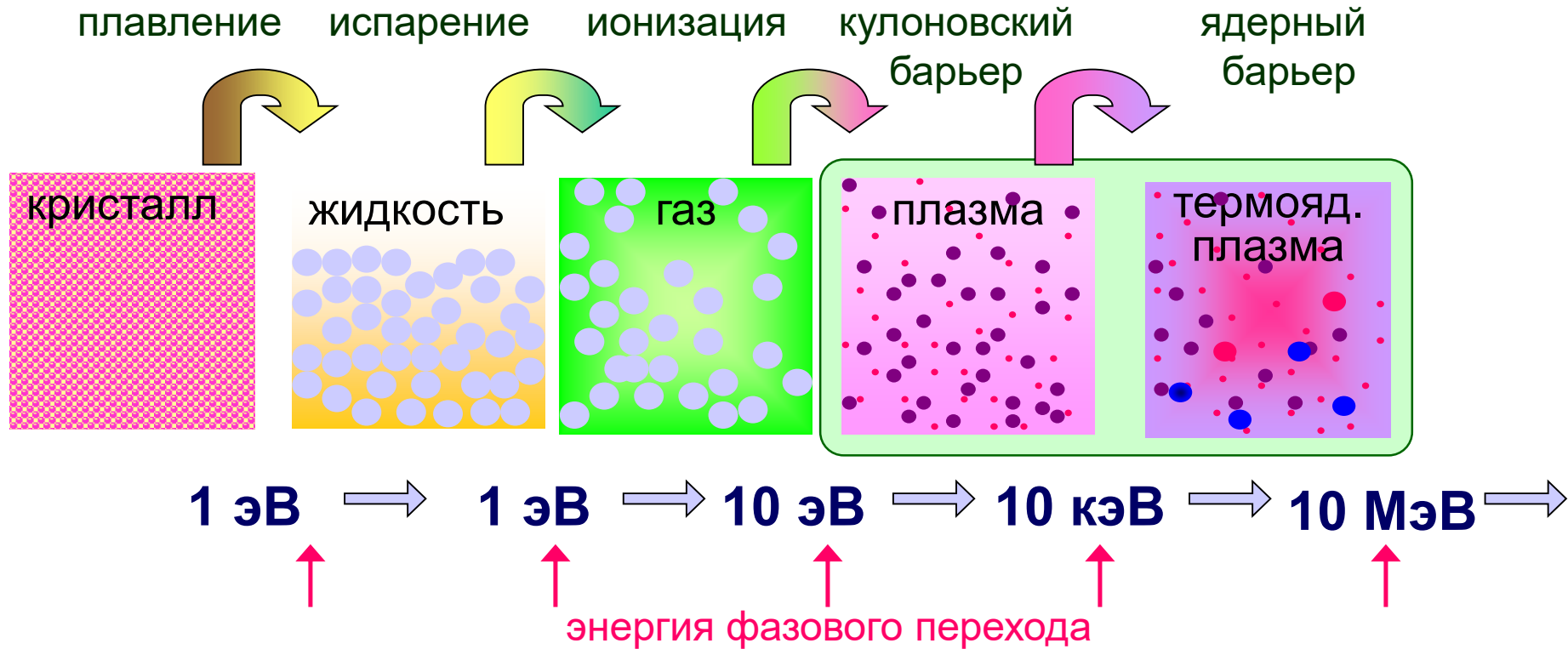
Есть дополнительные условия для того, чтобы вещество можно было считать плазмой.

В частности, частиц должно быть достаточно много для того, чтобы проявились свойства, характерные для плазмы.

квазинейтральная: количество положительных и отрицательных зарядов в единице объёма практически одинаково.

В физике плазмы обычно температура измеряется в энергетических единицах ($k = 1$), **1 электронвольт = 11600 кельвинов**

Четвёртое состояние вещества



Кажется, что при переходе к плазме увеличивается хаос в системе, но на самом деле это не так! Плазма обладает свойствами, принципиально отличающими её от газа.

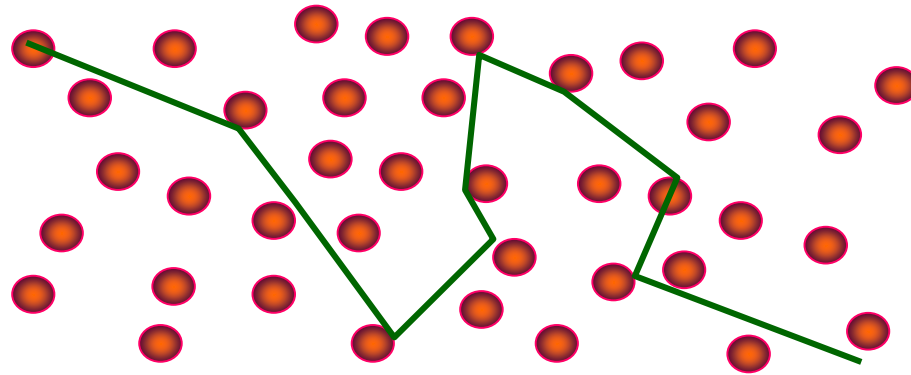
Взаимодействие частиц в плазме

- В резком отличии свойств плазмы от свойств нейтральных газов определяющую роль играют два фактора.
- Во-первых, взаимодействие частиц плазмы между собой характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания, убывающими с расстоянием гораздо медленнее (то есть значительно более «дальнодействующими»), чем силы взаимодействия нейтральных частиц.

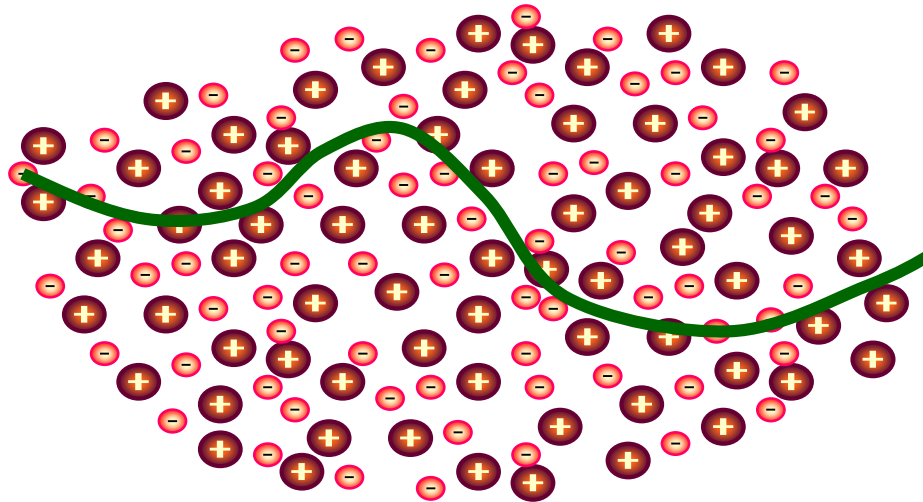
По этой причине взаимодействие частиц в плазме является, строго говоря, не «парным», а «коллективным» — одновременно взаимодействует друг с другом большое число частиц.

- Во-вторых, электрические и магнитные поля очень сильно действуют на плазму (в то время как они весьма слабо действуют на нейтральные газы), вызывая появление в плазме объёмных зарядов и токов и обуславливая целый ряд специфических свойств плазмы.

Траектории частиц в плазме



газ



плазма

В плазме частицы летят по плавно изменяющимся траекториям!
Основная часть столкновений приводит к повороту на малый угол.
длина свободного пробега $\Rightarrow$ длина поворота на угол порядка 1

Основные свойства плазмы

- Плазма обладает собственной частотой

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}$$

Плазменная частота зависит только от концентрации и не зависит от температуры

- Горячая плазма является хорошим проводником

$$\sigma = \frac{n e^2}{m_e \nu} \approx \frac{T_e^{3/2}}{4\pi \Lambda e^2 \sqrt{m_e}}$$

Проводимость плазмы зависит только от её температуры и не зависит от концентрации

удельное сопротивление:

медь

термоядерная плазма

$1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м

$T = 10$ кэВ: $5 \cdot 10^{-10}$ Ом·м

- Магнитное поле «вморожено» в высокотемпературную плазму

Магнитный поток через любой жидкий контур сохраняется

⇒ силовые линии «текут» вместе с плазмой.

- Плазма является диамагнетиком

Плазма как диамагнетик выталкивается в область слабого магнитного поля

⇒ трудно построить установку, где плазма будет удерживаться!

План лекции

- Энергетика и экология. Изменение климата.
- Альтернативная энергетика.
- Ядерная энергетика.
- Управляемый термоядерный синтез.
- Плазма как четвёртое состояние вещества.
- **Состояние термоядерных исследований в мире.**

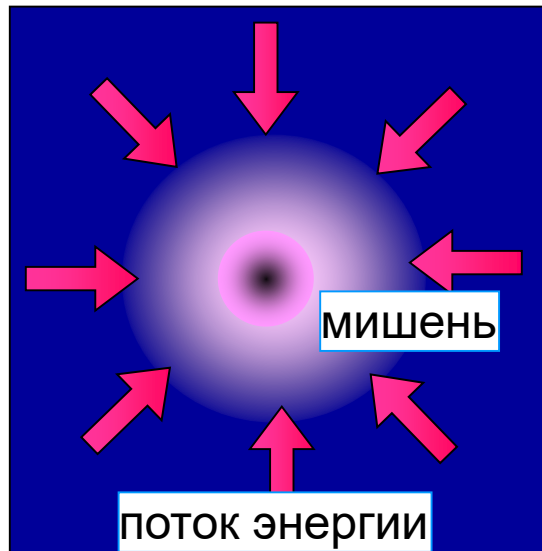
Типы удержания плазмы

Принципы удержания

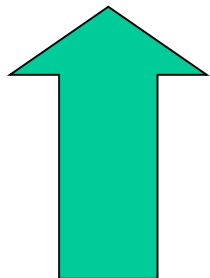
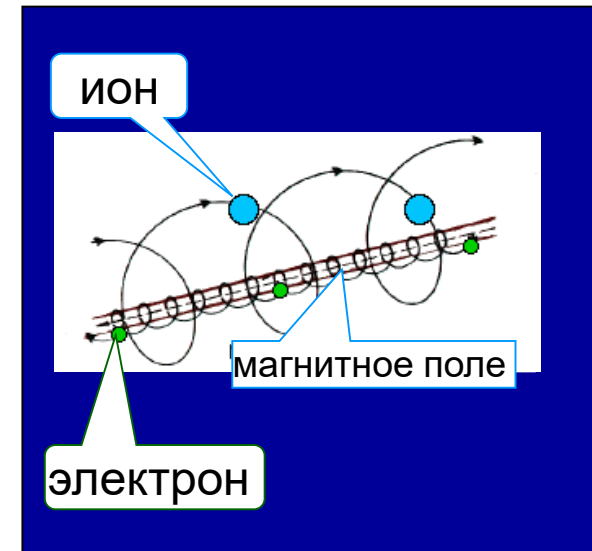
Гравитационное



Инерциальное



Магнитное



Солнце как источник энергии

В центре Солнца:

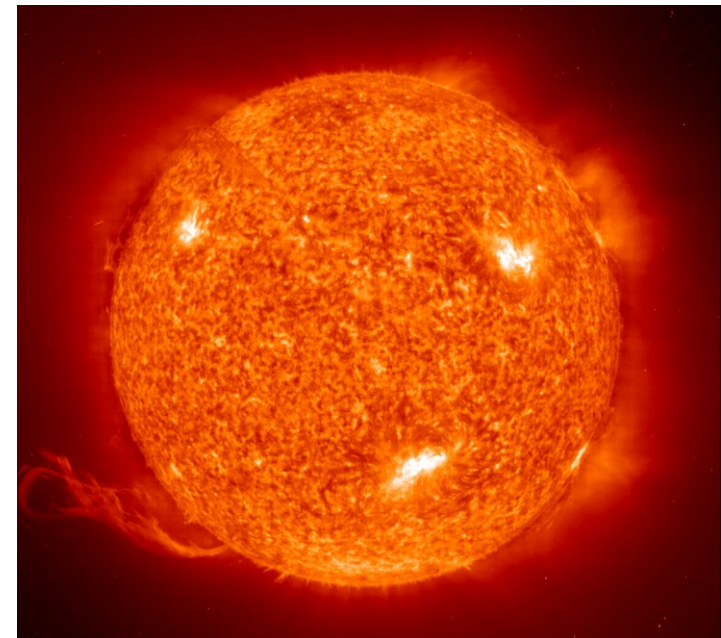
- Плотность плазмы очень велика: $n \sim 10^{30} \text{ м}^{-3}$, обеспечивается гравитацией.
- Температура плазмы $T \sim 16$ миллионов градусов ($\sim 1,5 \text{ кэВ}$).
- Идёт несколько цепочек ядерных реакций, но итоговый результат одинаков.
4 протона $\Rightarrow$ альфа-частица + 2 нейтрино + 26,7 МэВ
- Сечение реакции очень мало, но полное энергосвечение велико.
- Среднее время выгорания водорода ~ 10 миллиардов лет (возраст Солнца ~ 6 миллиардов лет).
- Среднее энергосвечение: $0,27 \text{ Вт/м}^3$.

в центре Солнца:

$$P_{\text{тя}}(r=0)_{\odot} \sim 20 \text{ Вт/м}^3$$

это существенно меньше, чем
энергосвечение человеческого тела!

$$P_{\text{body}} = \frac{Q}{t \cdot M / \rho} \approx 1200 \text{ Вт/м}^3$$



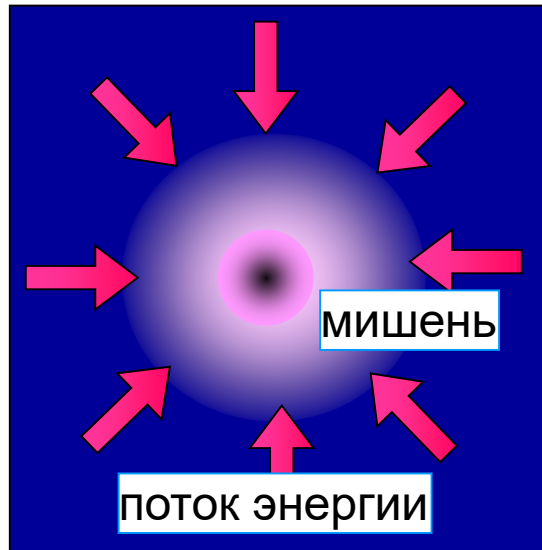
Типы удержания плазмы

Принципы удержания

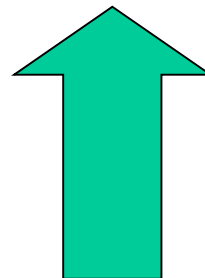
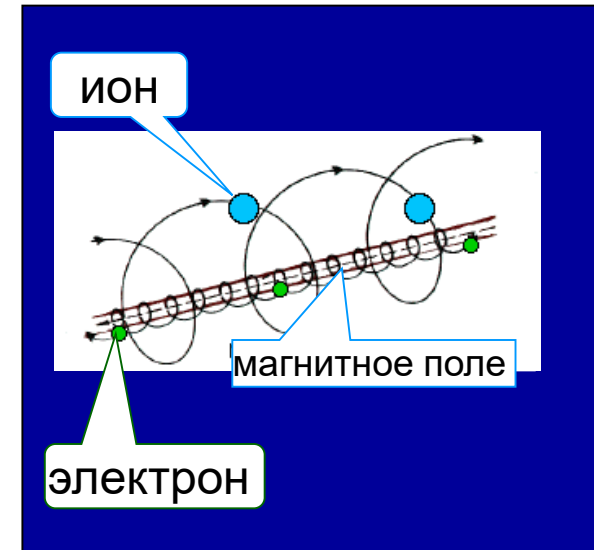
Гравитационное



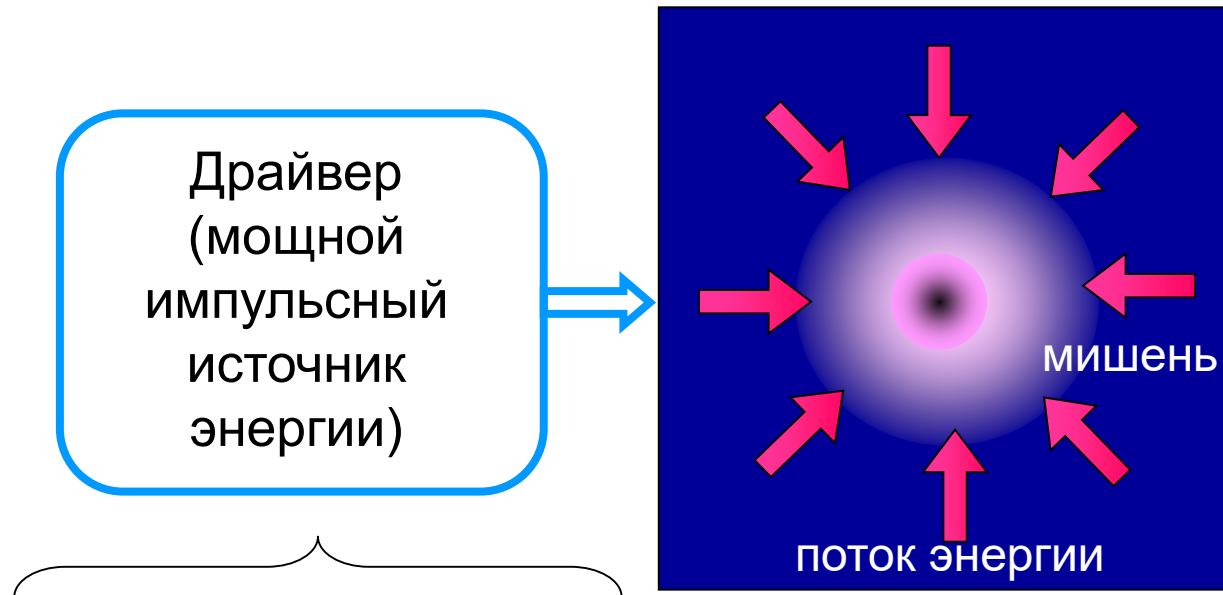
Инерциальное



Магнитное



Инерциальное удержание плазмы



- Лазеры
- Рентгеновское излучение
- *Тяжёлые ионы*

- Для получения микровзрыва требуется сжимать вещество в ~ 1000 раз (иначе нужна чрезмерно большая энергия драйвера)
- Оптимальным является сферическое обжатие мишени
- Нужно передать мишени ~ 1 МДж за $1 \div 10$ нс.

Стадии сжатия мишени

Драйвер производит сферическое облучение мишени



Термоядерное оружие



Bluestone: >1 MT, Christmas Island, 30.Jun.1962

© Copyright 1998-2002 AJ Software & Multimedia



400 кТ, Семипалатинский полигон, 12 августа 1953

http://img1.liveinternet.ru/images/attach/c/6/90/352/90352517_1208533.jpg

National Ignition Facility (Ливермор, США)

скопировано из GoogleEarth

Неодимовый лазер

- 192 лазерных луча
- мощность 500 ТВт
- энергия 2,03 МДж (08.2012)
- на мишени 1,875 МДж
- длительность 3-4 нс.
- лучи 40x40 см
- 3ω (0,35 мкм)
- повторяемость канала <1%

Статус: 29 мая 2009 г.
введён в эксплуатацию,

Эксперименты с мишенью:
6 октября 2010 г. —
1 МДж, криогенная мишень

**05.XII.2022 г. — впервые
получен положительный
выход энергии**

стоимость ~4 G\$



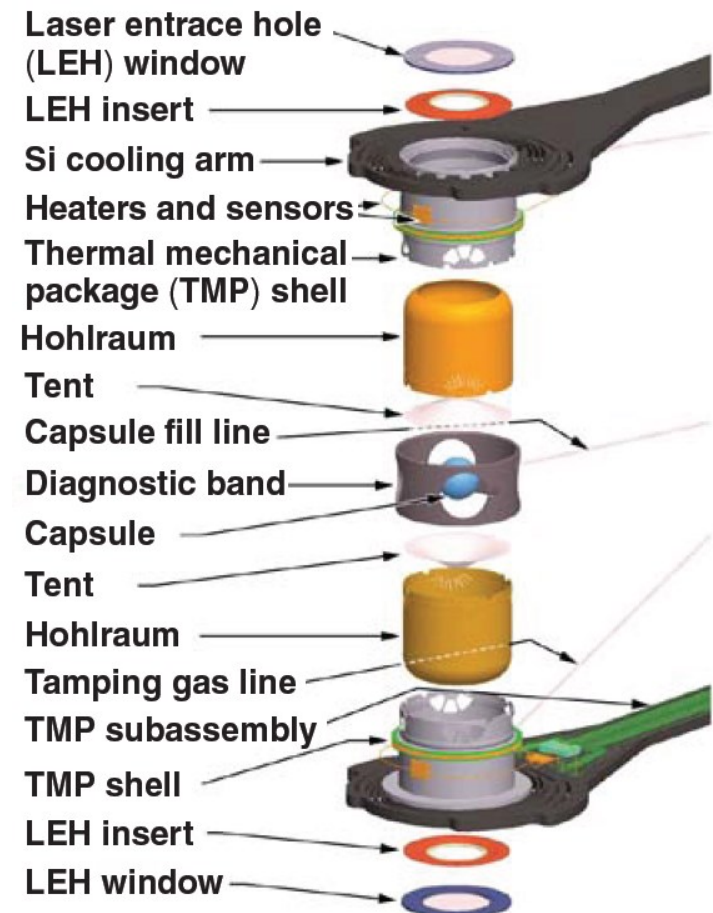
Эксперименты на NIF

6 октября 2010 г. – первый опыт с облучением криогенной мишени

Мишень: смесь H, D, T. Лазер: >1 МДж.

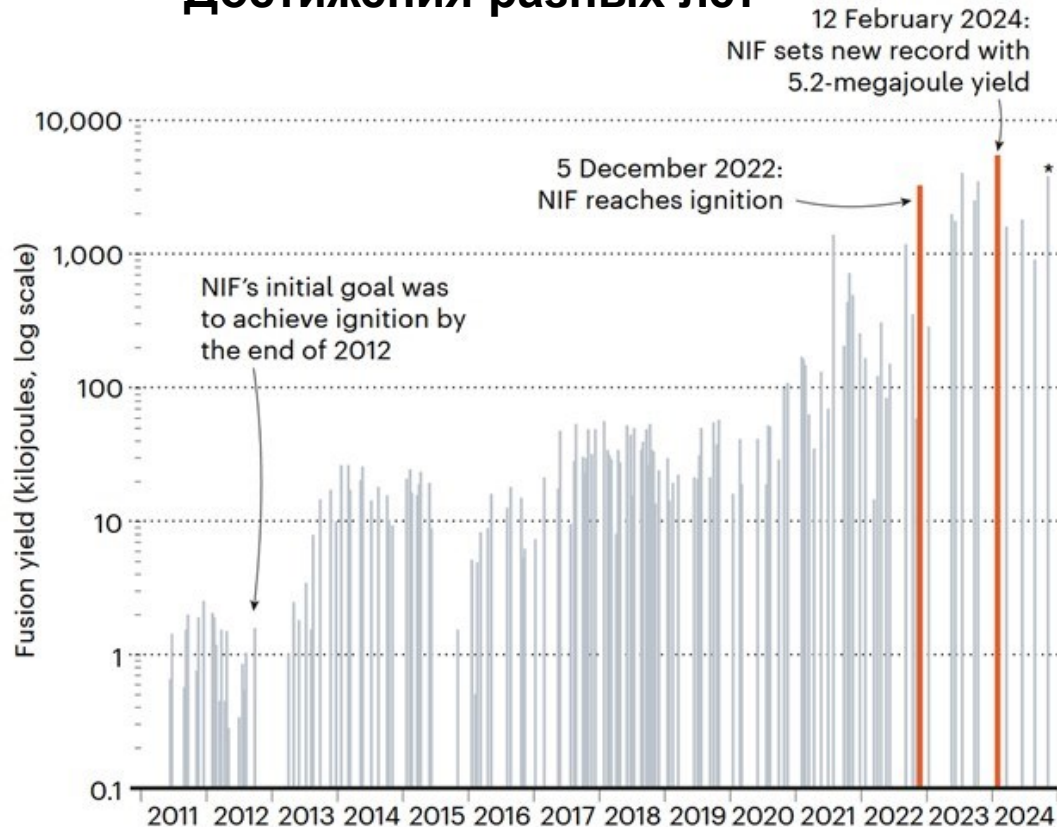


мишень перед выстрелом



Результаты NIF на 01.11.2023

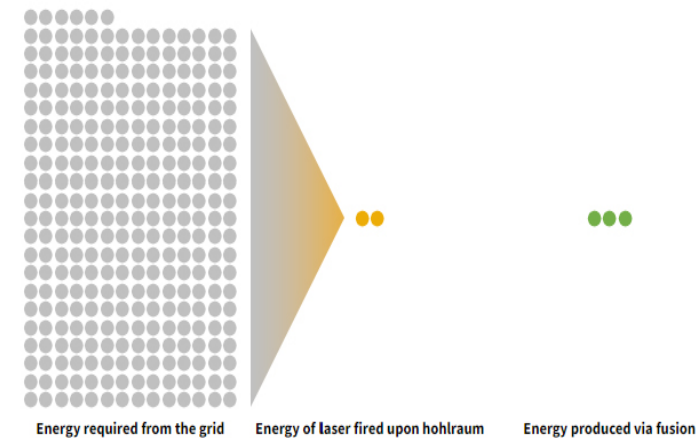
Достижения разных лет



Полный энергобаланс

● = 1 МДж

от розетки лазер т/я реакция

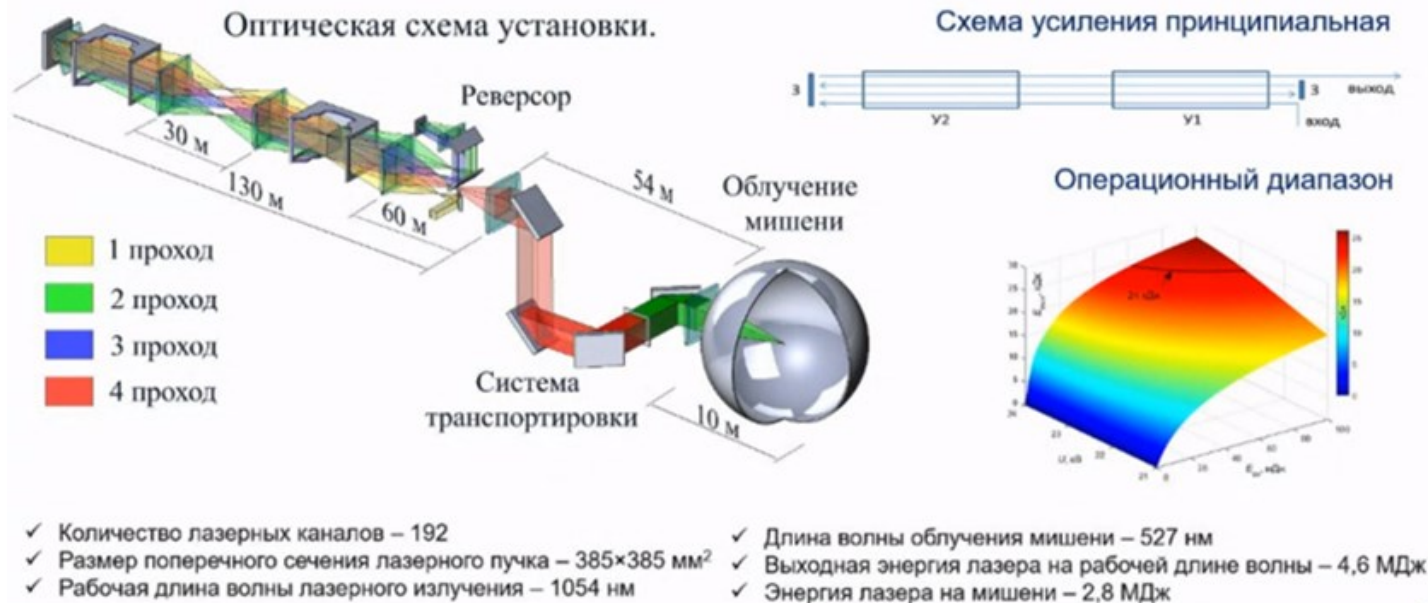


<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.2.20221213a/full/>



<https://optics.org/news/14/11/38>

Россия: установка УФЛ-2М (строится)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Завершен первый этап создания российской установки мегаджоульного класса. Проведен монтаж 4-х усилительных модулей, создана инфраструктура, обеспечивающая работу установки в целом.
- 2 Фабрика мишеней обеспечивают производство мишеней разного типа и класса сложности, диагностический комплекс - регистрацию и обработку данных с необходимой для расчетного моделирования точностью.
- 3 Введен в эксплуатацию многоцелевой исследовательский комплекс МИК, использующий энергию двух усилительных модулей в 4-х пучковой геометрии облучения, начаты эксперименты по физике высоких плотностей энергии.
- 4 В 2023 г. проведено более 100 экспериментов по нескольким тематическим направлениям. На МИК планируется около 200 экспериментов в год одновременно с производством работ по дальнейшему вводу установки в эксплуатацию.



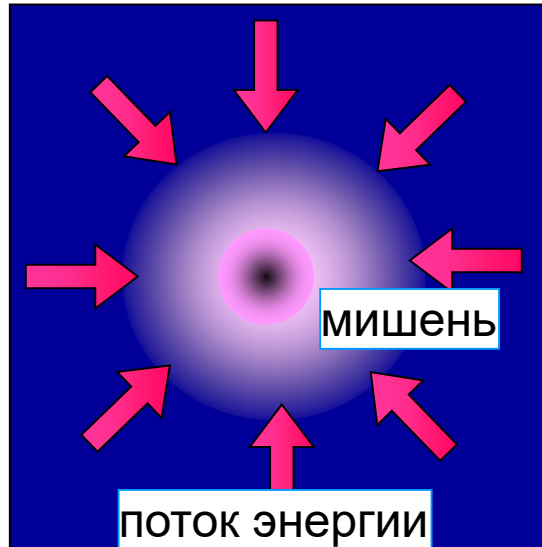
Типы удержания плазмы

Принципы удержания

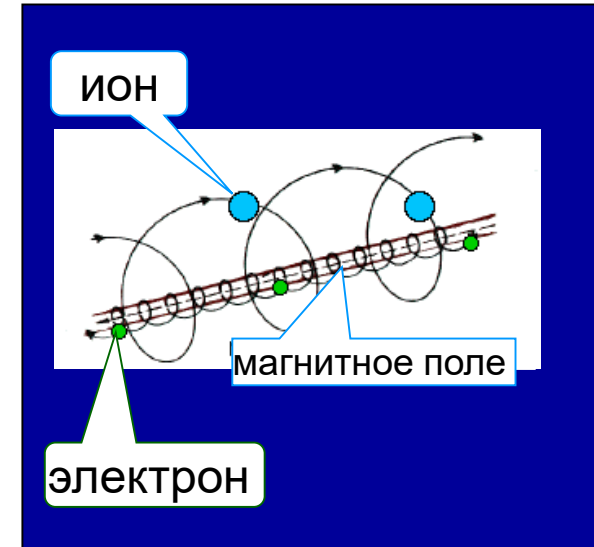
Гравитационное



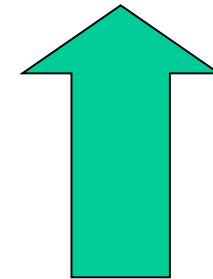
Инерциальное



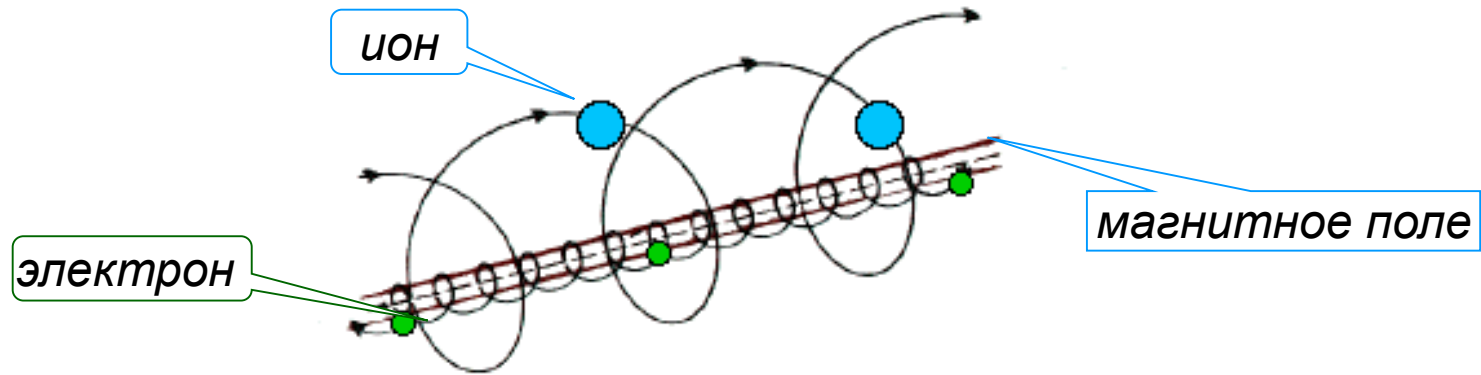
Магнитное



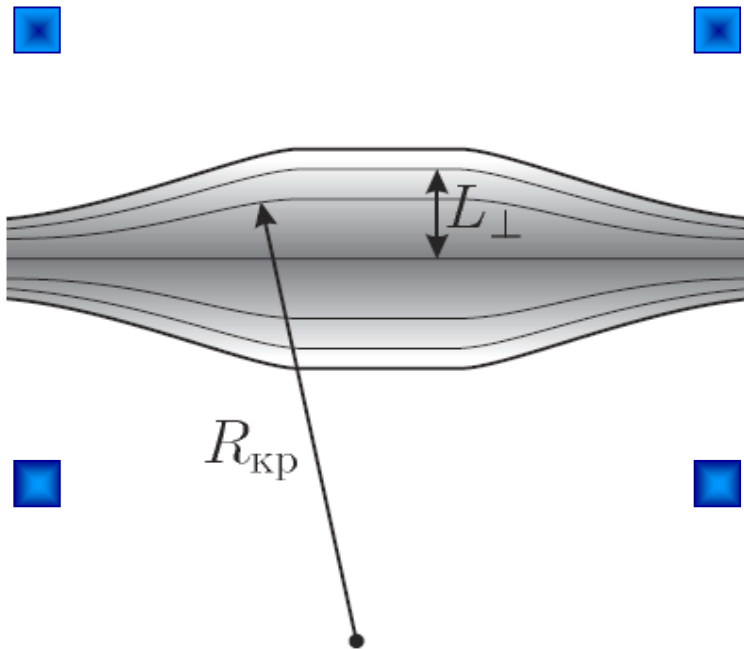
Существует несколько десятков разных конфигураций магнитных систем, которые в принципе могут привести к созданию термоядерного реактора



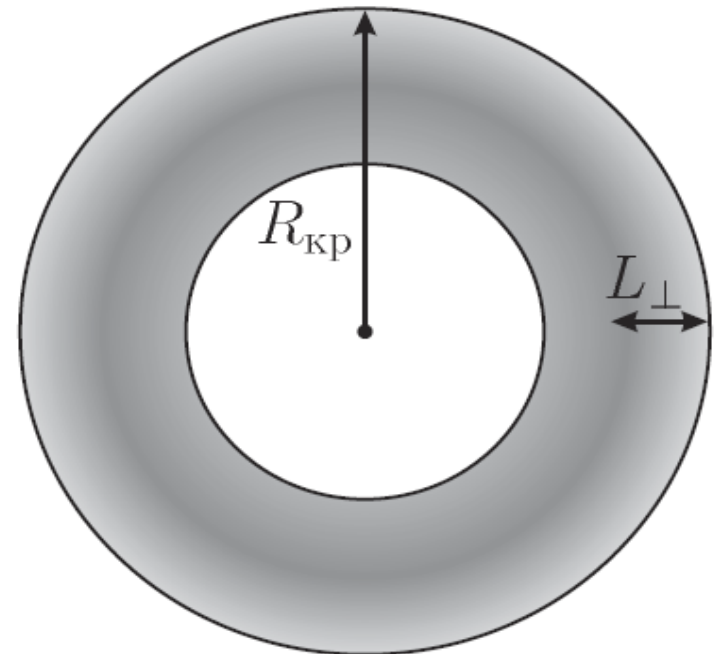
Линейные и тороидальные конфигурации



пробкотрон Будкера-Поста
(простейшая открытая ловушка)

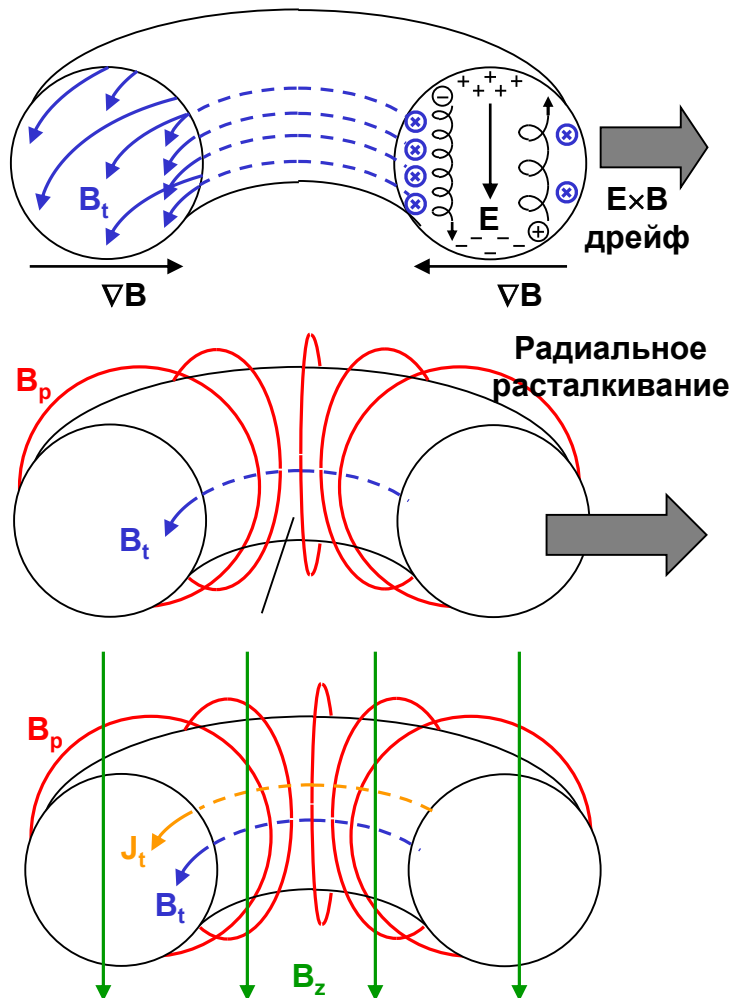


тороидальная система
(отсутствуют потери частиц
и энергии через торцы)



Тороидальная плазма

В «простом» тороидальном магнитном поле плазму удержать нельзя из-за возникающей поляризации и дрейфа плазмы наружу



- Проблема 1: нужно устранить потери тепла и частиц вдоль магнитного поля

- Решение 1: Замыкание в тор решает проблему концевых потерь
- Проблема 2: В простом тороидальном поле дрейф приводит к разделению зарядов

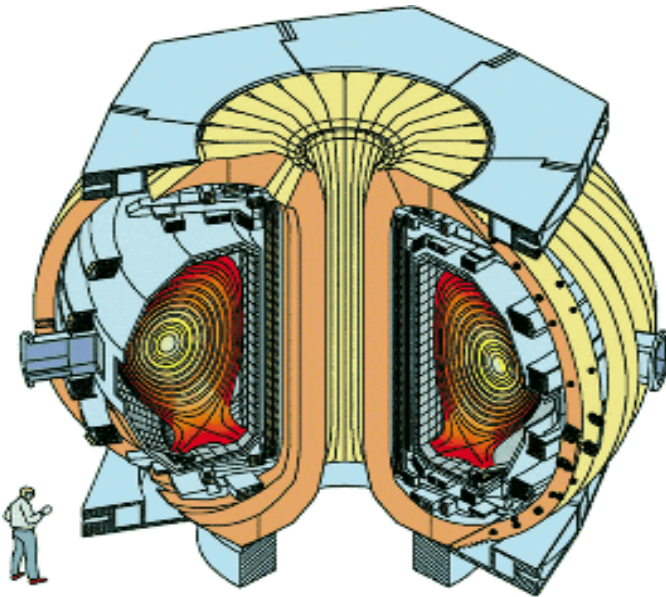
- Решение 2: Добавление полоидального поля (винтовая структура поля) приводит к компенсации дрейфа.
- Проблема 3: Возникновение радиального расталкивания из-за диамагнетизма плазмы.

- Решение 3: Добавление вертикального поля для компенсации расталкивания.
- Проблема

Схемы с тороидальным полем

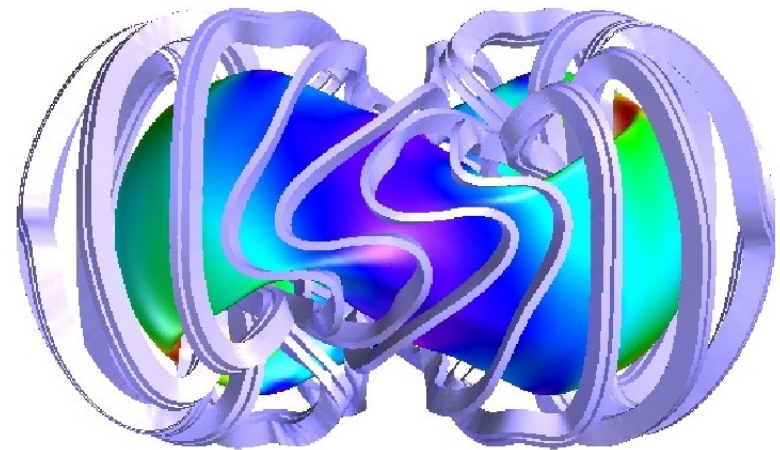
Два основных подхода к получению тороидальной плазмы (из ~10)

- а) создается током, текущим по плазме (токамак)



- Полоидальное поле создается плазменным током.
- Есть ось симметрии – хорошее удержание
- Ток – это источник неустойчивостей
- Трудно сделать стационар

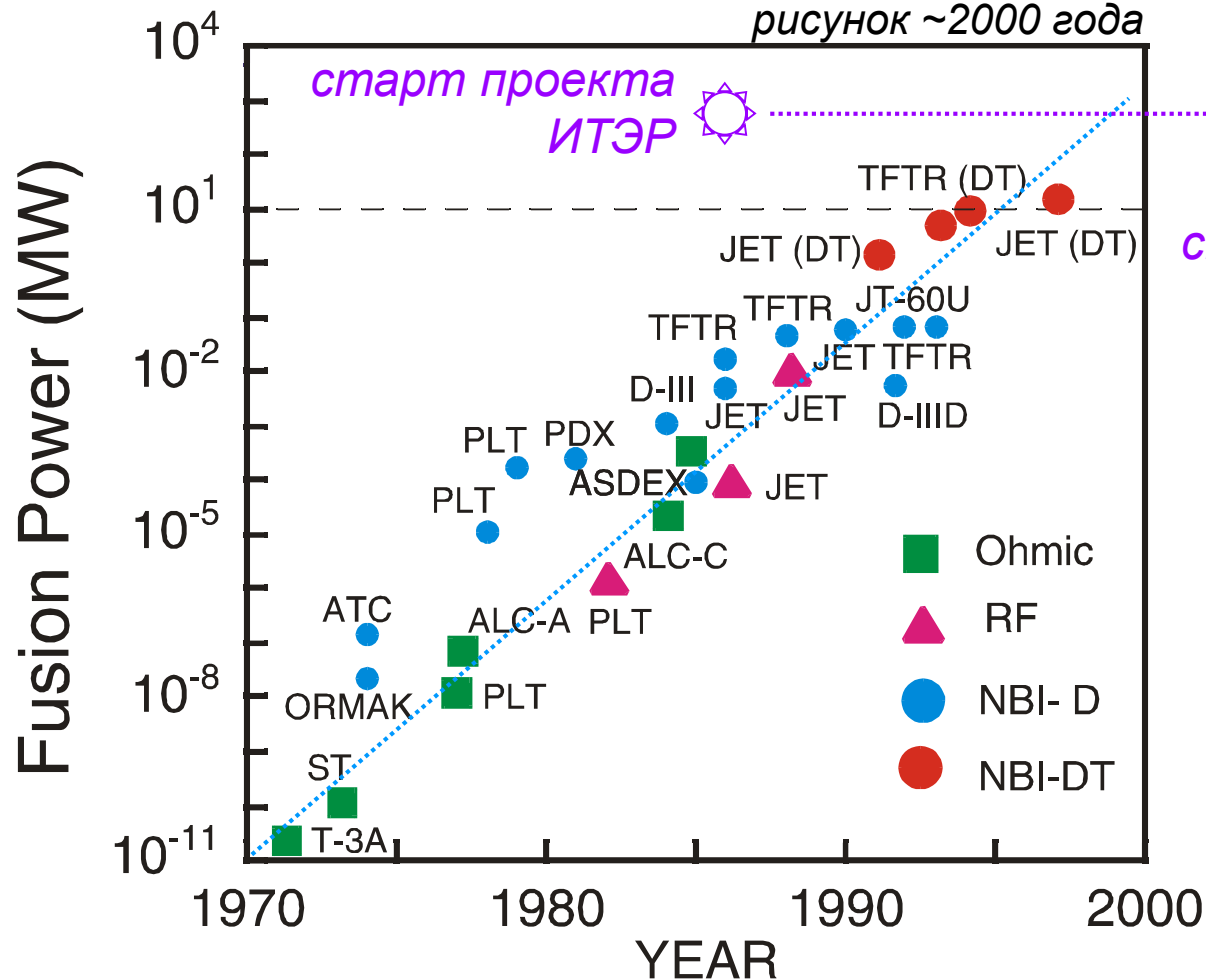
- б) создается внешними обмотками (стелларатор)



- Полоидальное поле создается внешними обмотками
- Нет осевой симметрии – трудно достичь хорошего удержания
- Стационарная работа
- Техническая сложность

Прогресс в достигнутой Т/Я мощности

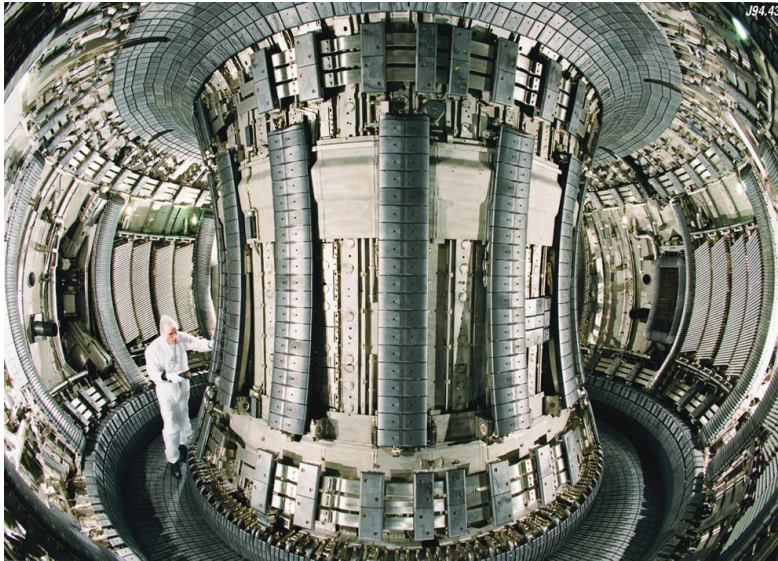
рисунок ~2000 года



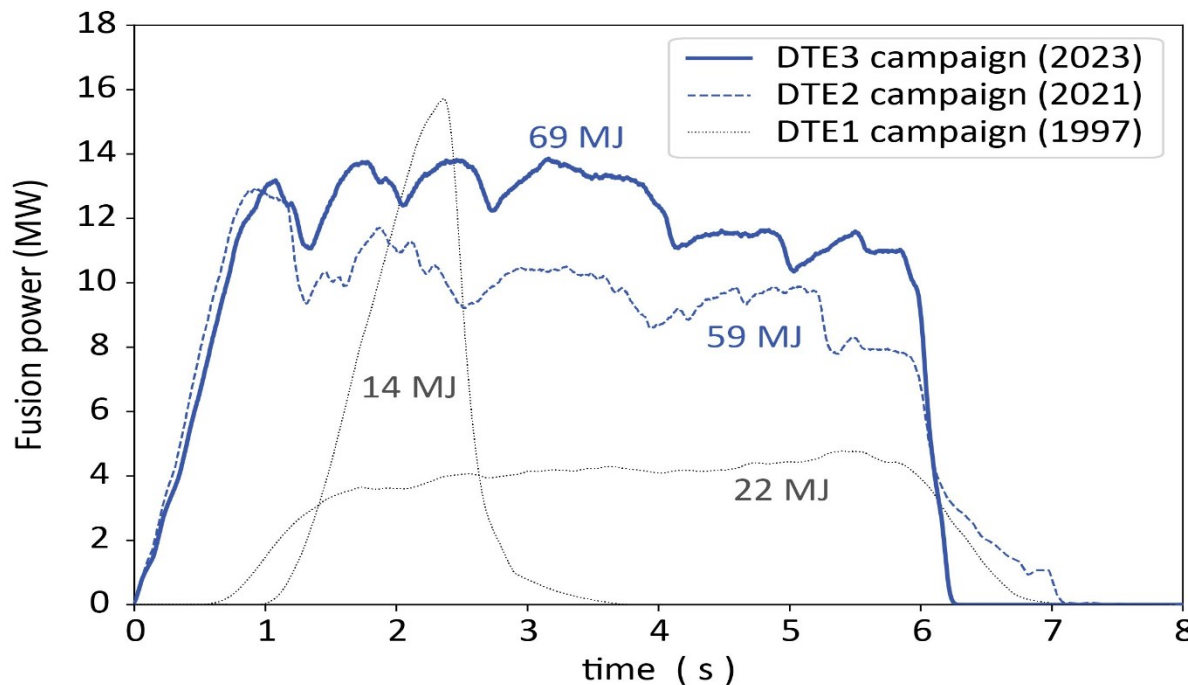
- до 1997 года динамика развития была более быстрой, чем известный закон Мура в микроэлектронике!
- после 1997 года прогресса нет, так как нет установок следующего поколения

Токамак JET: работа с 1982 по 2023 годы

В.В.Поступаев ■ Энергетика и экология. Термоядерная энергетика



вакуумная камера JET, 1984



рекордная мощность
термоядерной D-T
реакции в токамаке JET

Проект ИТЭР и участие ИЯФ в нём

Iter = путь (лат.), *устаревш.* International Tokamak Experimental Reactor

Участники: ЕС, Япония, США, Россия, Китай, Юж.Корея, Индия

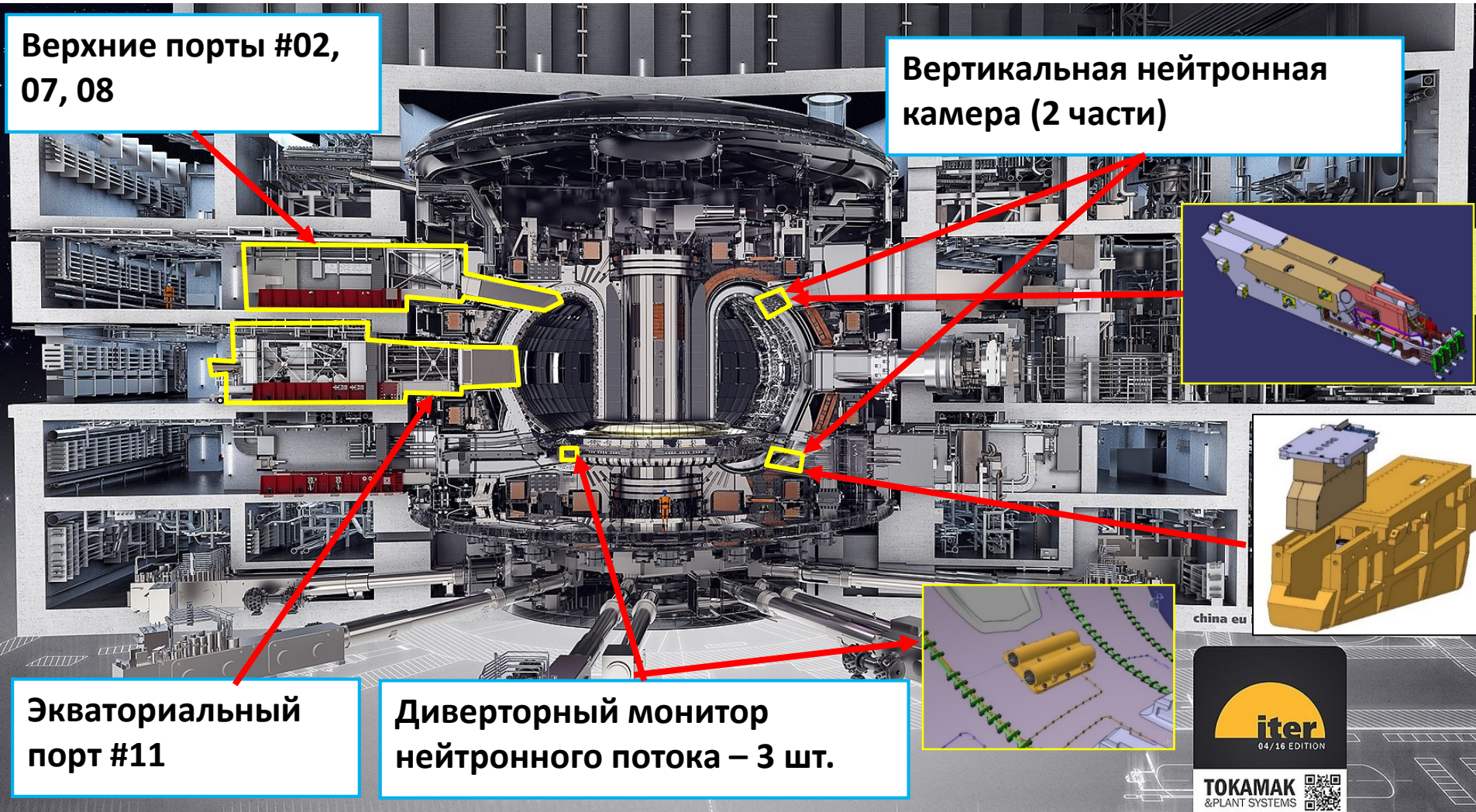
жёлтым цветом выделено оборудование, которое поставляет ИЯФ СО РАН

Верхние порты #02,
07, 08

Вертикальная нейтронная
камера (2 части)

Экваториальный
порт #11

Диверторный монитор
нейтронного потока – 3 шт.



Официальные цели проекта ИТЭР

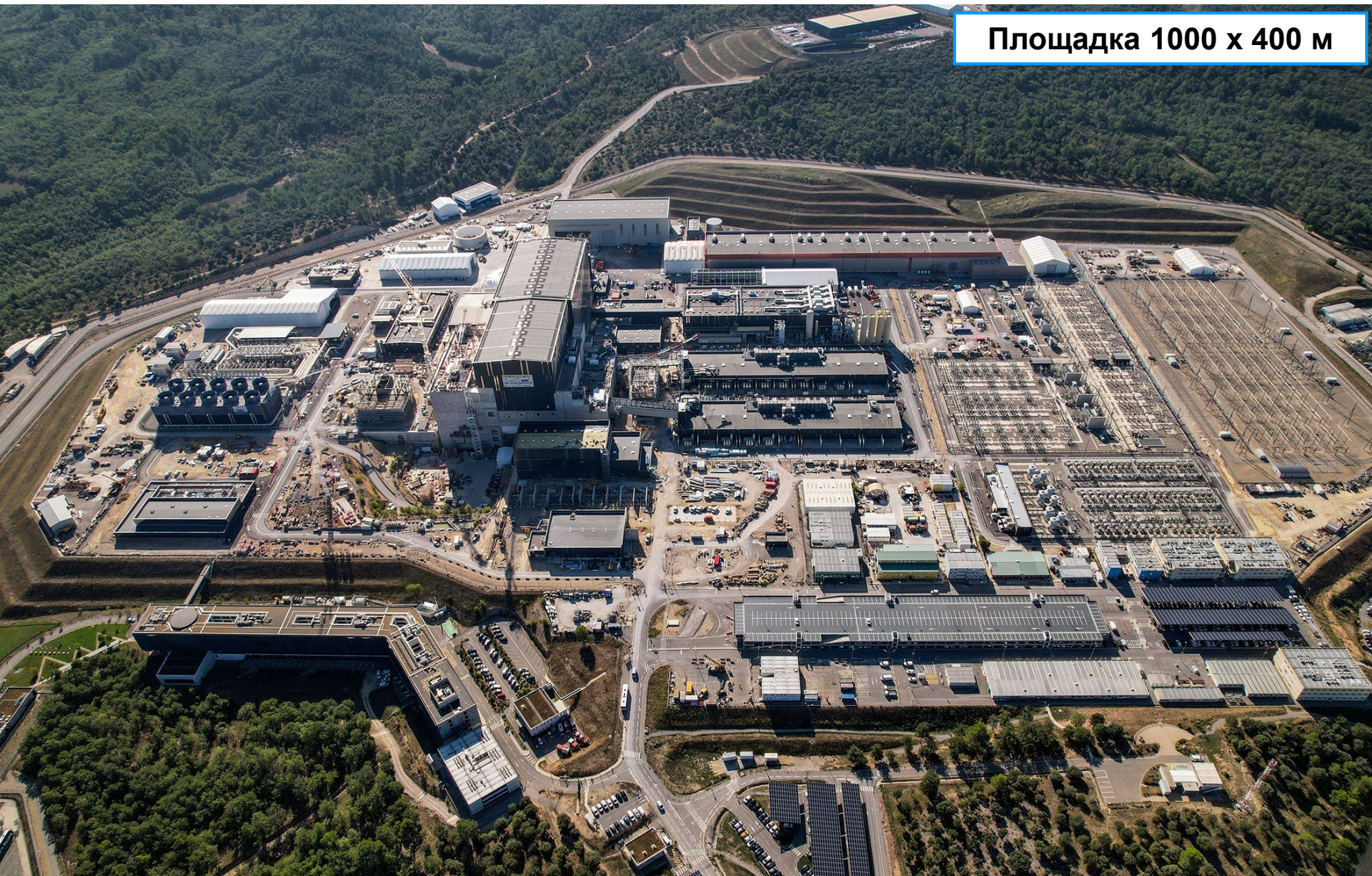
- продемонстрировать длительное квазистационарное горение с $Q = 10$;
- продемонстрировать стационарное горение с $Q = 5$;
- отработка термоядерных технологий и систем;
- испытание материалов для будущего реактора (нейтронный поток $0,5 \text{ МВт/м}^2$);
- испытание систем наработки трития в blankets;
- срок службы 20 лет, >10000 импульсов.

Технические и физические параметры (основной сценарий)

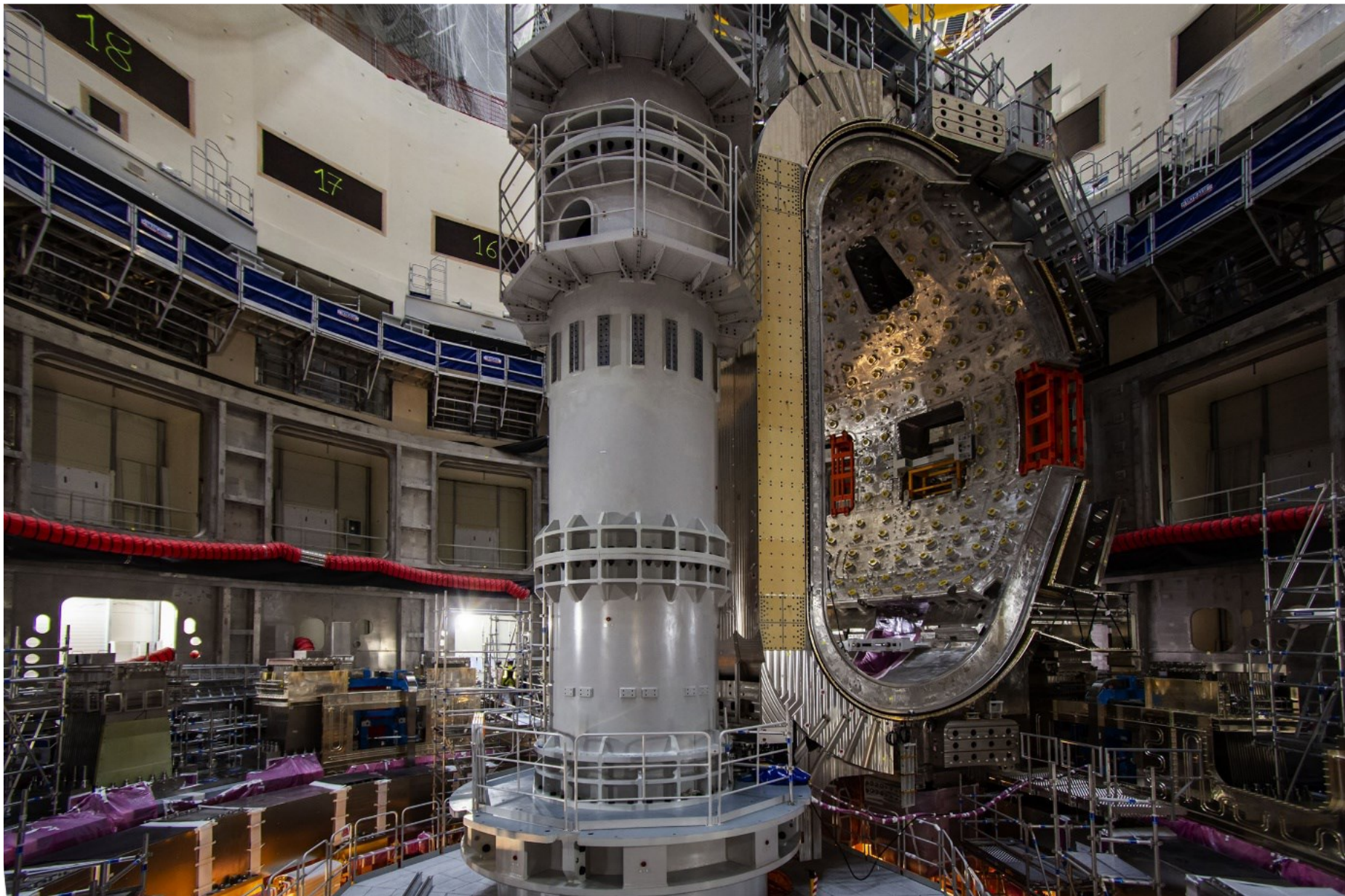
Размеры, R/a	м/м	6,2 / 2,0
Магнитное поле на оси, B	Тл	5.3
Плазменный ток, I_p	МА	15,0
Средняя плотность, $\langle n_e \rangle$	м ⁻³	$1,0 \cdot 10^{20}$
Термоядерная мощность, P	МВт	410
Усиление мощности, Q		10
Энергетическое время жизни, τ_E	с	3,7
Длительность разряда	с	400

Вид площадки ИТЭР • 27.09.2023

Площадка 1000 x 400 м



ИТЭР – сборка токамака



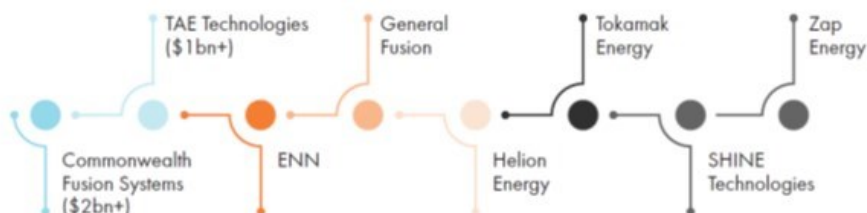
Жизнь в эпоху ИТЭР

- ИТЭР – это последний крупный проект глобальной кооперации в т/я энергетике
- дальше развитие идёт по национальным каналам
 - проекты новых установок с использованием ВТСП технологий
 - проекты национальных опытно-промышленных электростанций
- появились частные организации с быстрыми темпами работы

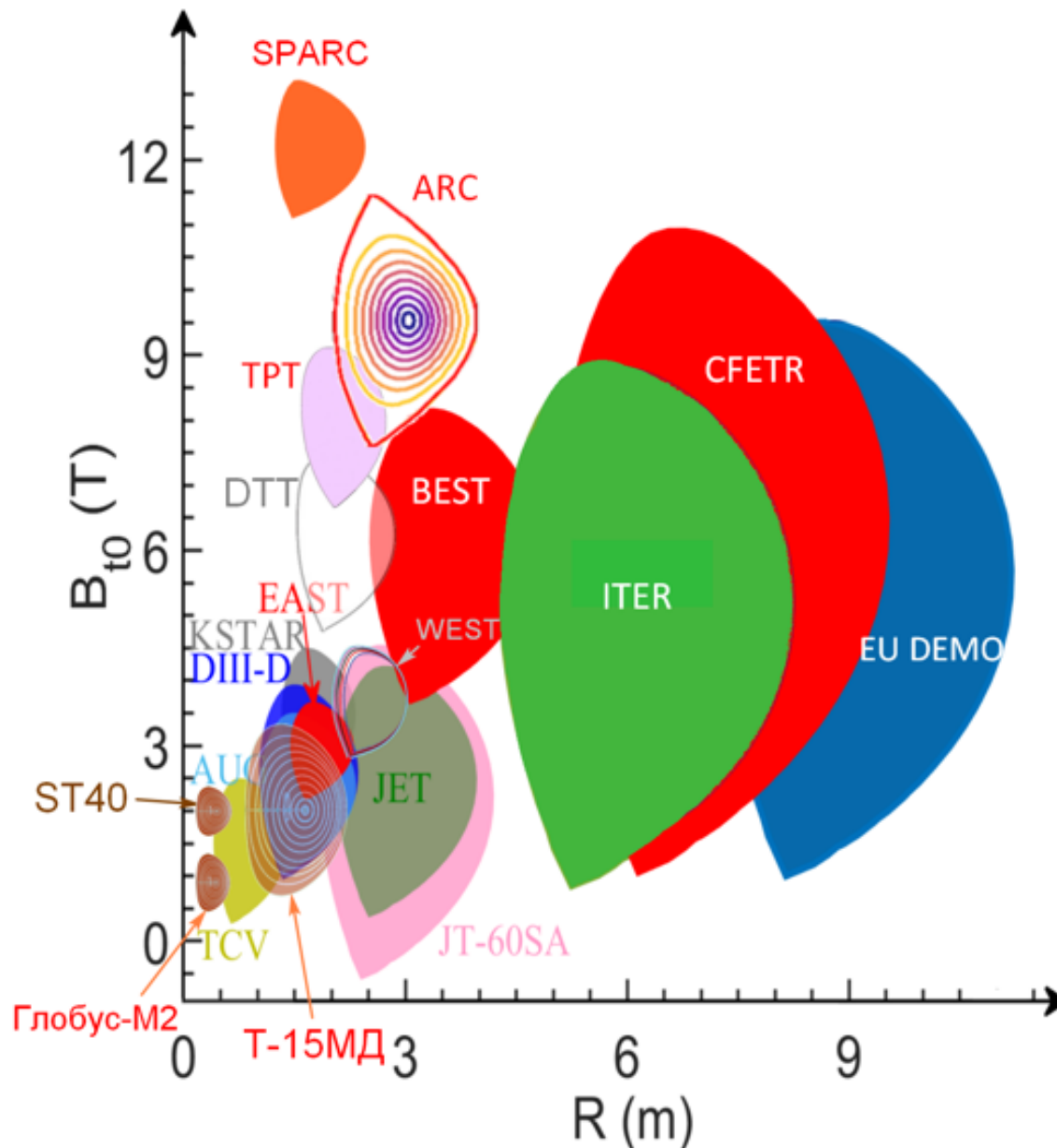
By primary HQ



4. COMPANIES WITH \$200M INVESTMENT OR MORE



Развитие линии токамаков



EU

TCV – работает, Sw
 Asdex-U – работает, Ge
 ST-40 – работает, UK
JET – закрыт 12.2023, UK
 WEST – работает, Fr
 DTT – строится (2026), It
 ITER – строится (2034), Fr
 EU-DEMO - проект

USA

DIII-D – работает
 ARC – проект
 SPARC – строится, ~2026

Asia

KSTAR – работает
 EAST – работает
 JT-60SA – работает
 BEST – строится, 2027
 CFETR - строится, 2035

РФ

Глобус-М2 - работает
 Т-15МД – работает
 ТРТ – проект, ~2036

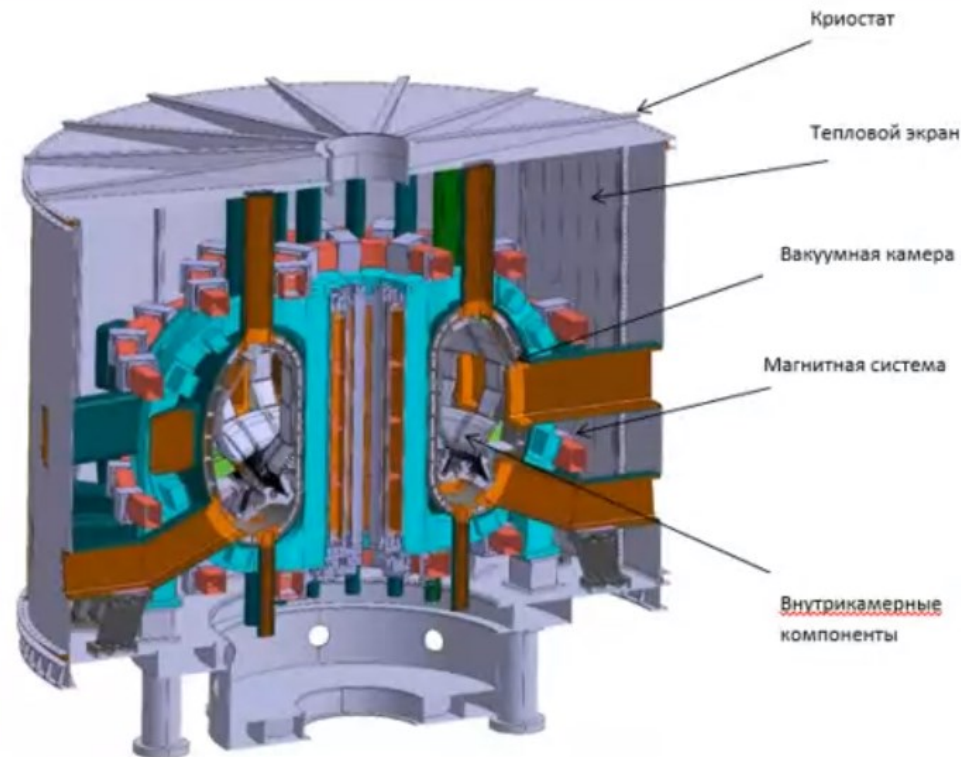
Национальная программа России

Концептуальный проект TRT на конец 2021

$$P_{\text{fus}} \sim \beta_t^2 B^4 V_p$$

Основные параметры и особенности TRT

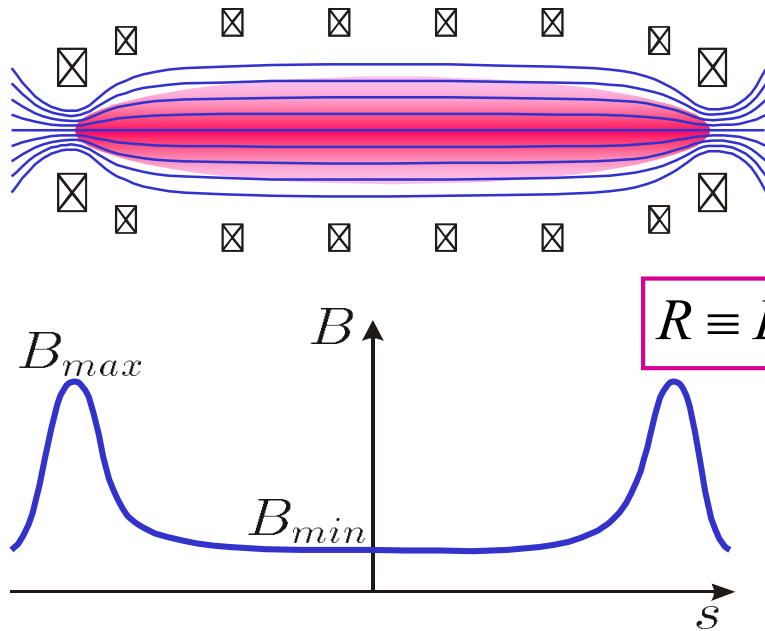
B (Т)	8 (14 пров)	Высокое поле, ВТСП
R/a	2.15/0.57	Классич. компакт. цена
Δt (с)	>100	Квазистационарный ($\epsilon > 0,2$ МВт/м ²)
I_p (МА)	4-5	Высокий ток
$n_e (10^{20} \text{ м}^{-3})$	1-2	Высокая плотность
$P_{\text{аух}}$ (МВт)	30 ~ 40	Реакторосовместимый нагрев и генерация тока
Q (DT)	> 1	Реакторная плазма



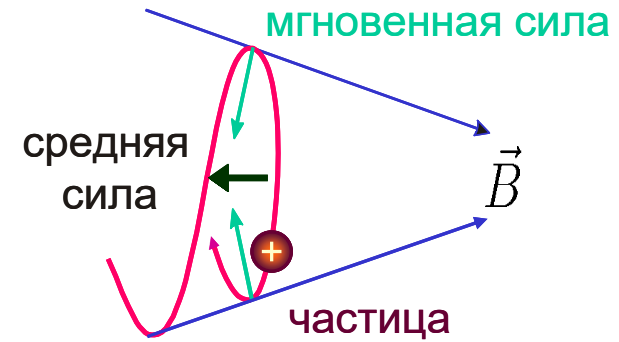
Концептуальный проект TRT разработан Частным учреждением ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР» в кооперации с ведущими специалистами АО НИИЭФА, НИЦ «Курчатовский институт» по заказу ГК Росатом в 2019-2021 годах

Ожидаемая дата создания установки – 2036 г.

Пробкотрон Будкера-Поста (начало 1950х)



$$R \equiv B_{\max} / B_{\min}$$



Инварианты движения:

энергия: $\varepsilon = \frac{mv^2}{2} = const$

магнитный момент: $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = const$

в область $B > \varepsilon / \mu$ частица зайти не может !

$$\Leftrightarrow \frac{mv_{\parallel}^2}{2} = \varepsilon - \mu B \geq 0$$

частицы удерживаются в пробкотроне, если $\sin \theta_0 = \frac{v_{\perp}}{v} = \sqrt{\frac{B_{\min}}{B_{\max}}}$

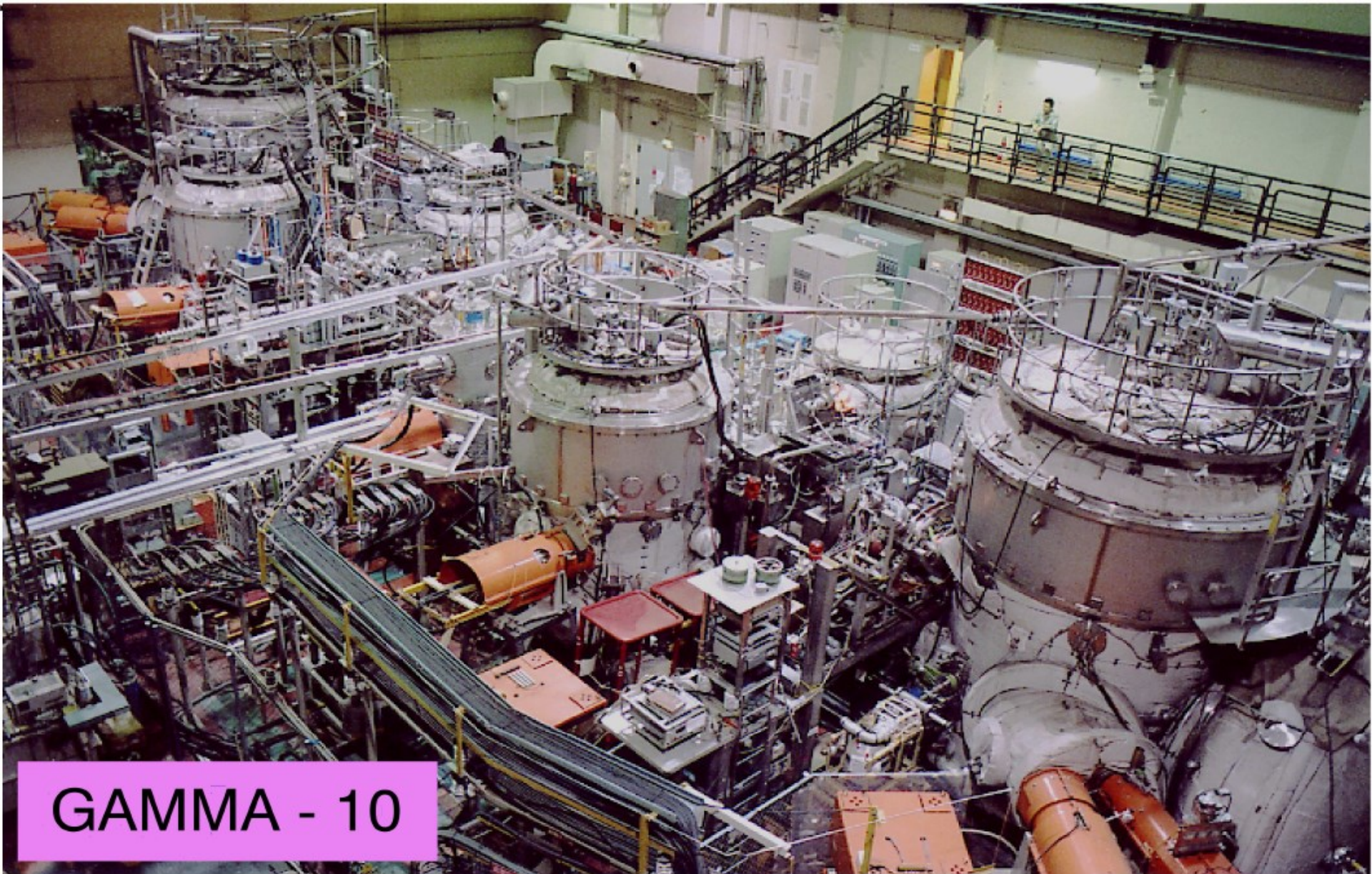
Современные открытые ловушки

В пробкотроне Будкера-Поста есть несколько опасных неустойчивостей, которые делают реактор на его основе невозможным

⇒ придуманы более совершенные схемы ловушек (ИЯФ СО РАН)

- амбиполярная ловушка (потенциал, возникающий в плазме относительно стенки камеры, используется для замедления разлёта частиц; сложная магнитная структура);
- газодинамическая ловушка (очень большое пробочное отношение, при достаточно высокой концентрации плазма не подвержена многим опасным неустойчивостям);
- центробежная ловушка (пробкотрон с вращающейся плазмой);
- многопробочная ловушка (магнитное поле периодически модулировано вдоль оси системы, плотная плазма);
- геликоидальная ловушка (спиральное магнитное поле и вращающаяся плазма);
- и другие варианты, отличающиеся по физике

Амбиполярная ловушка (Цукуба, Япония)

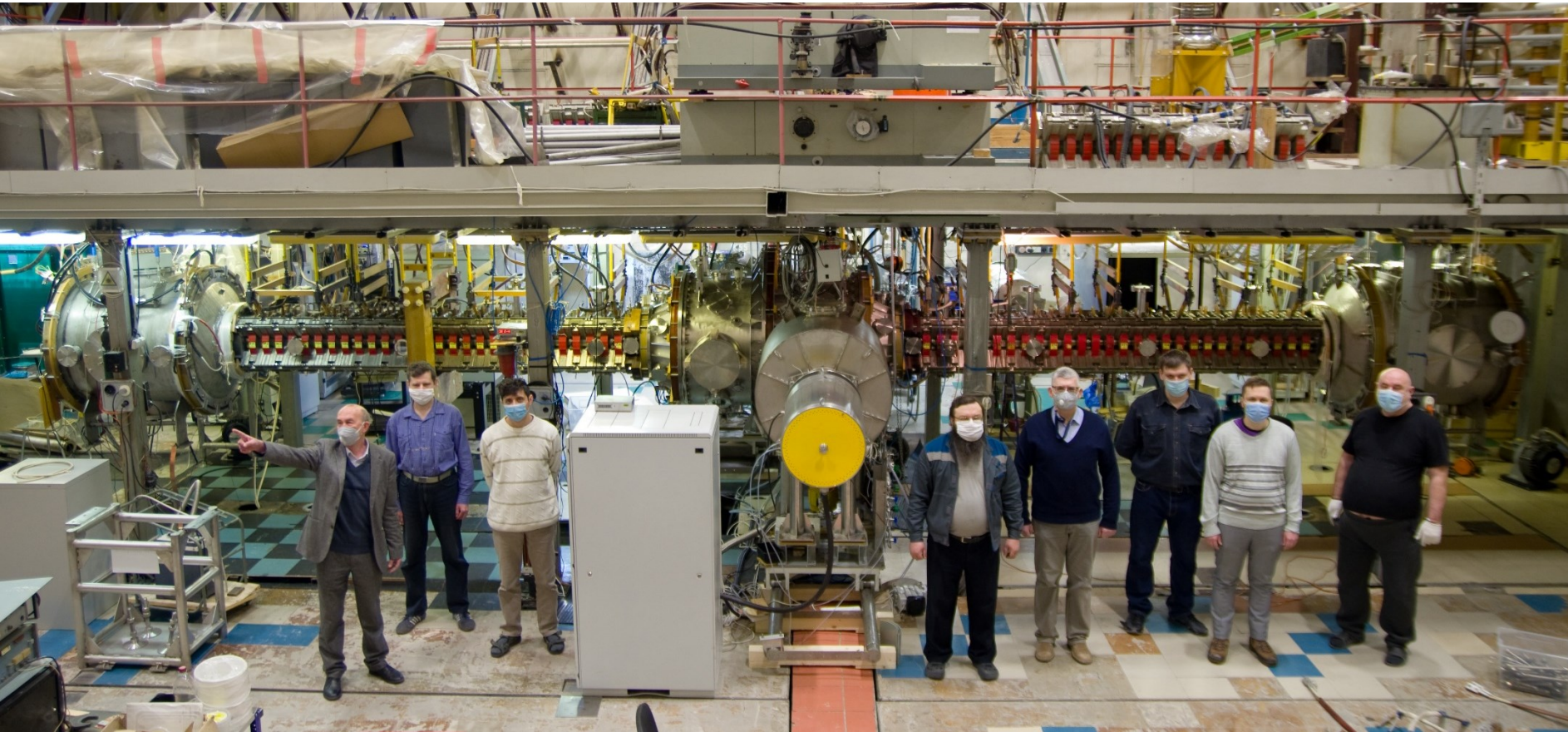


GAMMA - 10

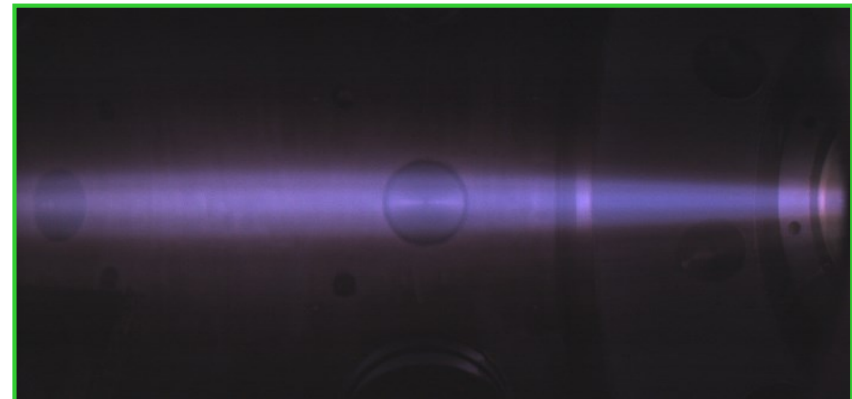
Газодинамическая ловушка (ИЯФ СО РАН)



Многопробочная ловушка ГОЛ-НВ

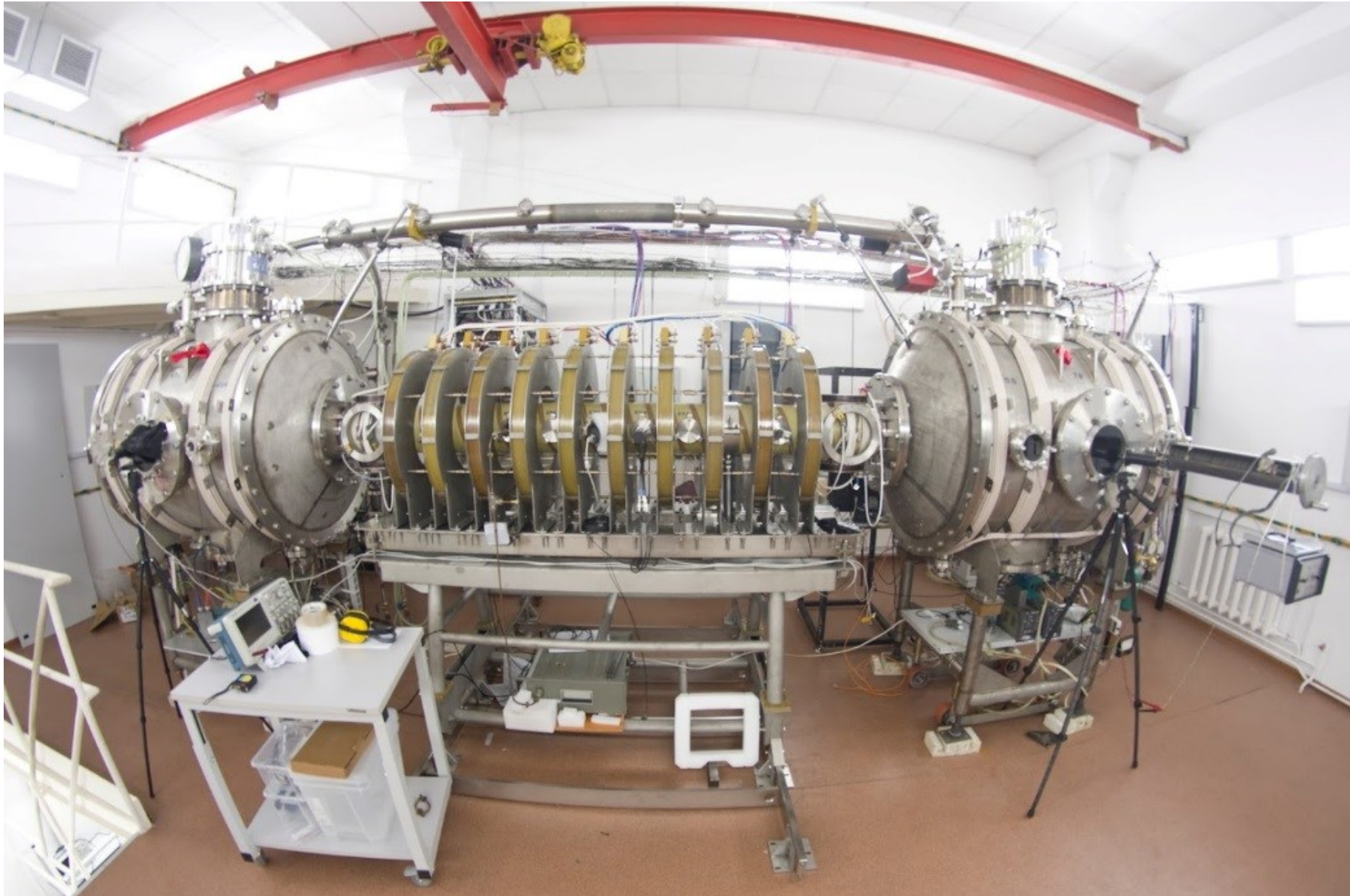


ИЯФ, первая плазма в 2018 г.,
полная конфигурация в марте 2021 г.



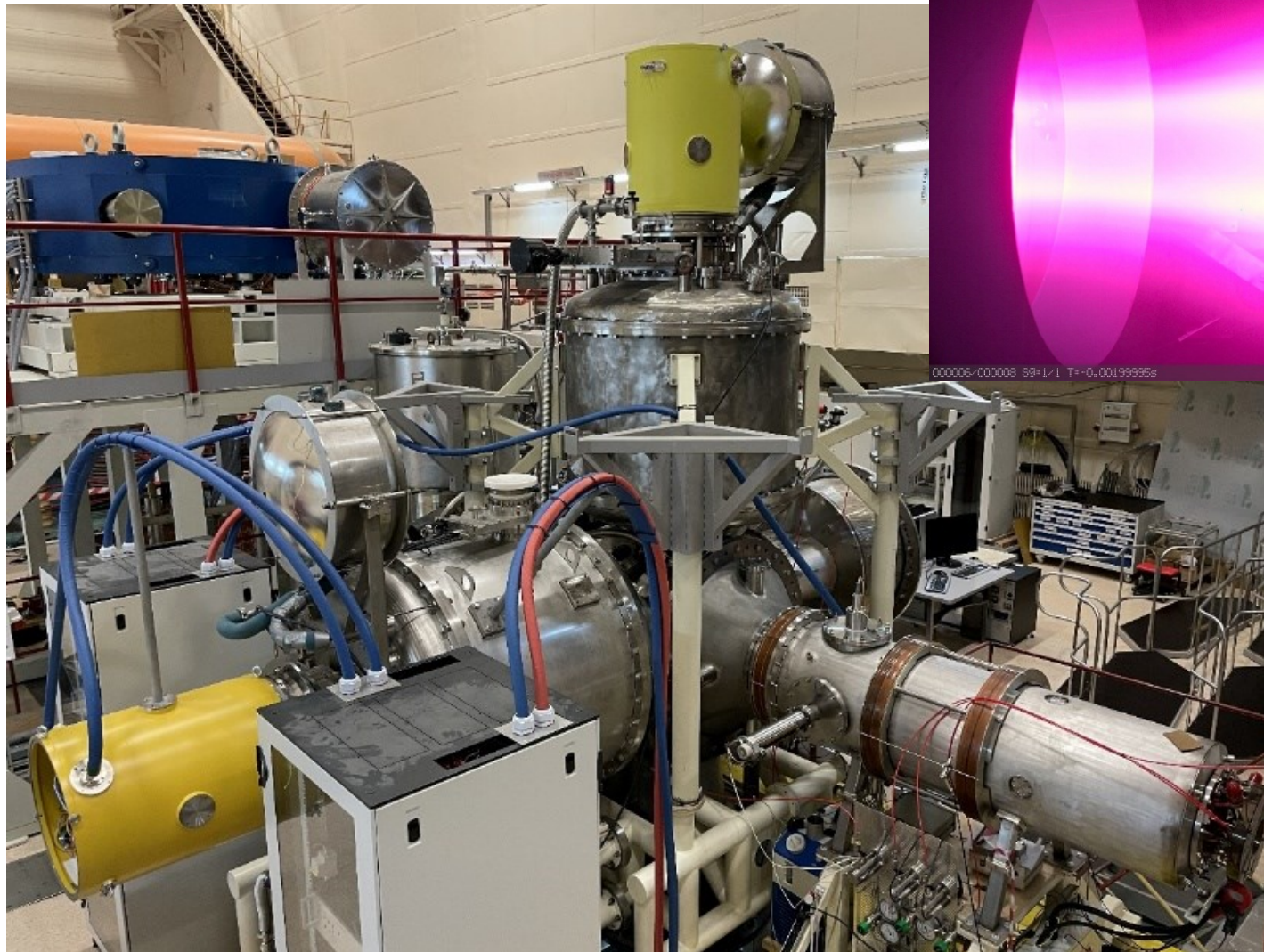
Геликоидальная ловушка СМОЛА

(ИЯФ, первая плазма в 2017 г.)



Установка КОТ (ИЯФ)

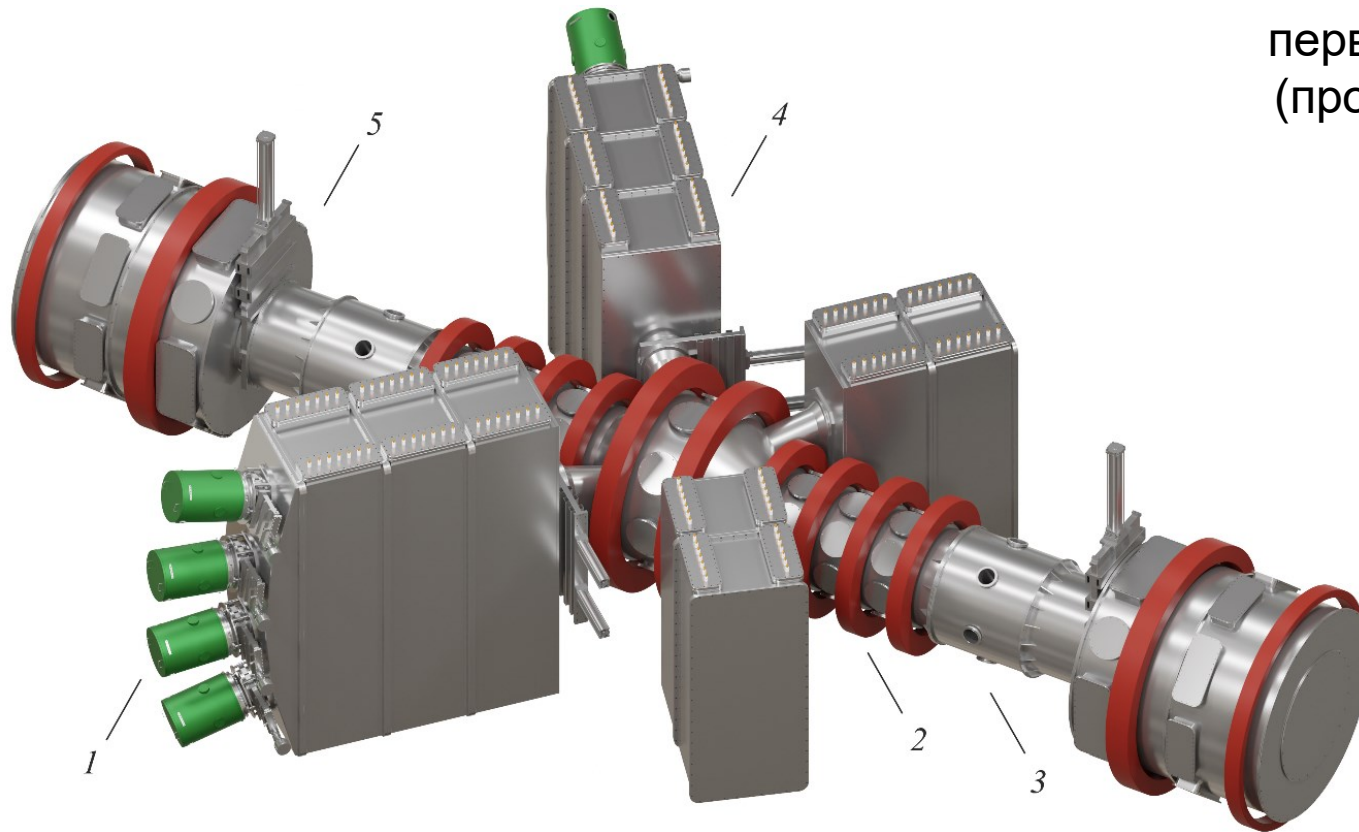
- задача: продемонстрировать возможность создания плазмоида с большой величиной $\beta \approx 1$ при интенсивной инжекции нейтральных пучков



000006/000008 S9+1/1 T+0.00199995s

Проект установки ГДМЛ в ИЯФ

- задача: продемонстрировать достижение высоких параметров плазмы
- физика: гибрид газодинамической и многопробочной ловушек
- технологии: сверхпроводящие магниты, мощная атомарная инжекция
- научный проект существует несколько лет и постоянно развивается



первая очередь
(проект 2022 г.)

Общий вид стартовой конфигурации установки ГДМЛ. 1 – инжектор атомарного пучка, 2 – соленоид и вакуумная камера центральной секции, 3 – криостат модуля магнитной пробки, 4 – камера нейтральной инжекции, 5 – камера и катушки расширительной секции.

Конец лекции

Спасибо за внимание !

дополнительная информация по физике плазмы
и исследованиям по управляемому термоядерному синтезу:

https://www.inp.nsk.su/~dep_plasma/