

# Энергетика будущего и самоорганизация плазмы

Ю.Н.Днестровский

Институт Ядерного Синтеза, РНЦ Курчатовский Институт

## О чем пойдет речь?

1. Энергетическая проблема в мире.
2. Трудности с возобновляемыми источниками.  
Почему они не могут решить проблему.
3. Атомная энергетика.
4. Что такое термоядерный синтез ?
5. Положение дела сейчас.
6. Что такое токамак и самоорганизация плазмы ?
7. Что впереди ?

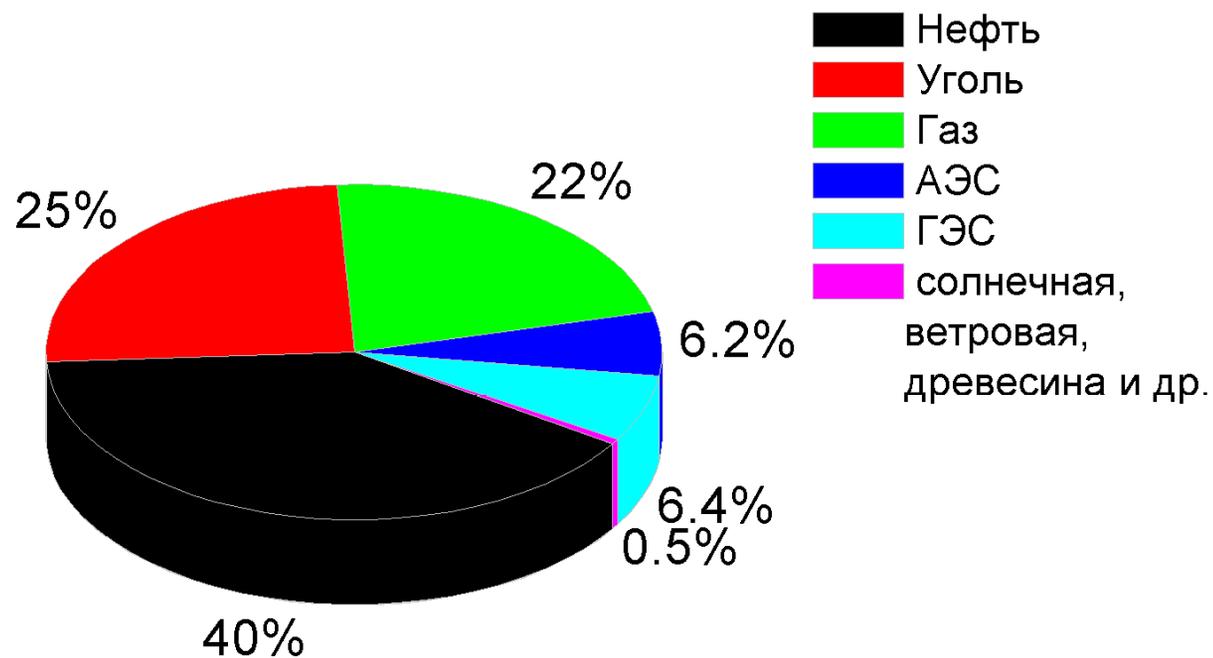
# Производство энергии

Человечество сталкивается со все возрастающими потребностями в энергии. Основная часть энергии производится сжиганием ископаемого топлива. .

Число возможных источников, которые **в долгосрочной перспективе** могут обеспечить заметную долю производства энергии, очень ограничено это - возобновляемые источники,

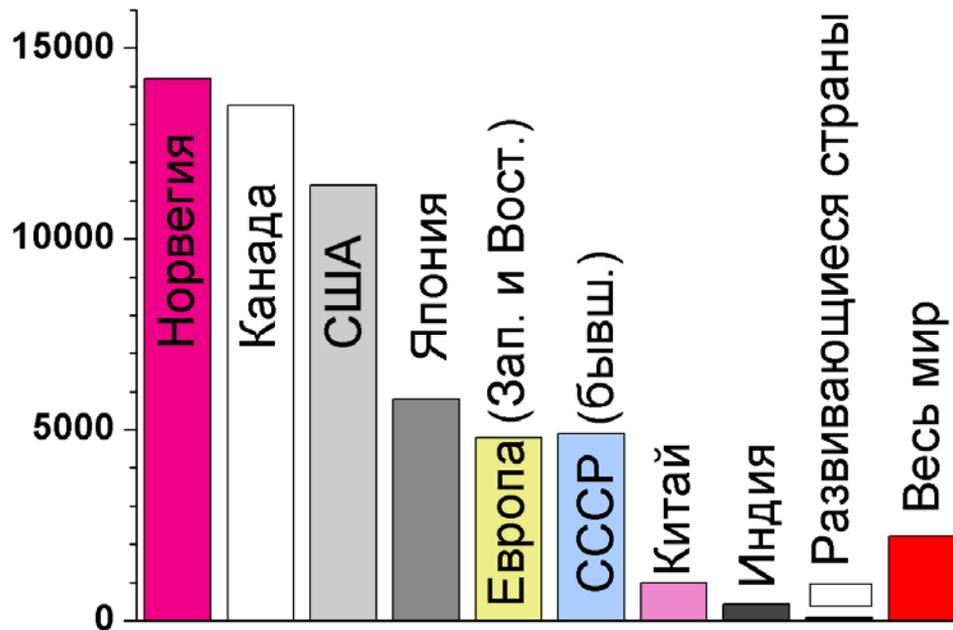
- уголь,
- ядерное деление (реакторы-размножители или бридеры)
- термоядерный синтез (**термояд**).

# Мировое производство энергии

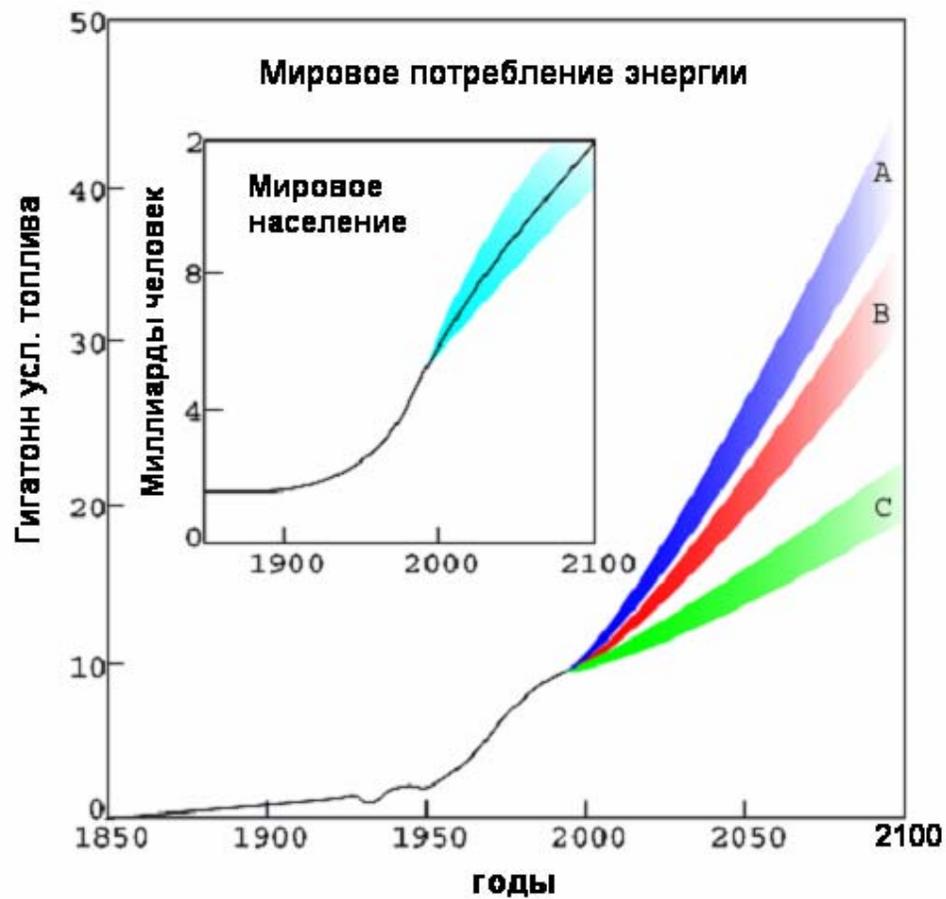


# Потребление энергии по странам

Ватт/чел



# Прогноз мирового потребления энергии



# Электроэнергия

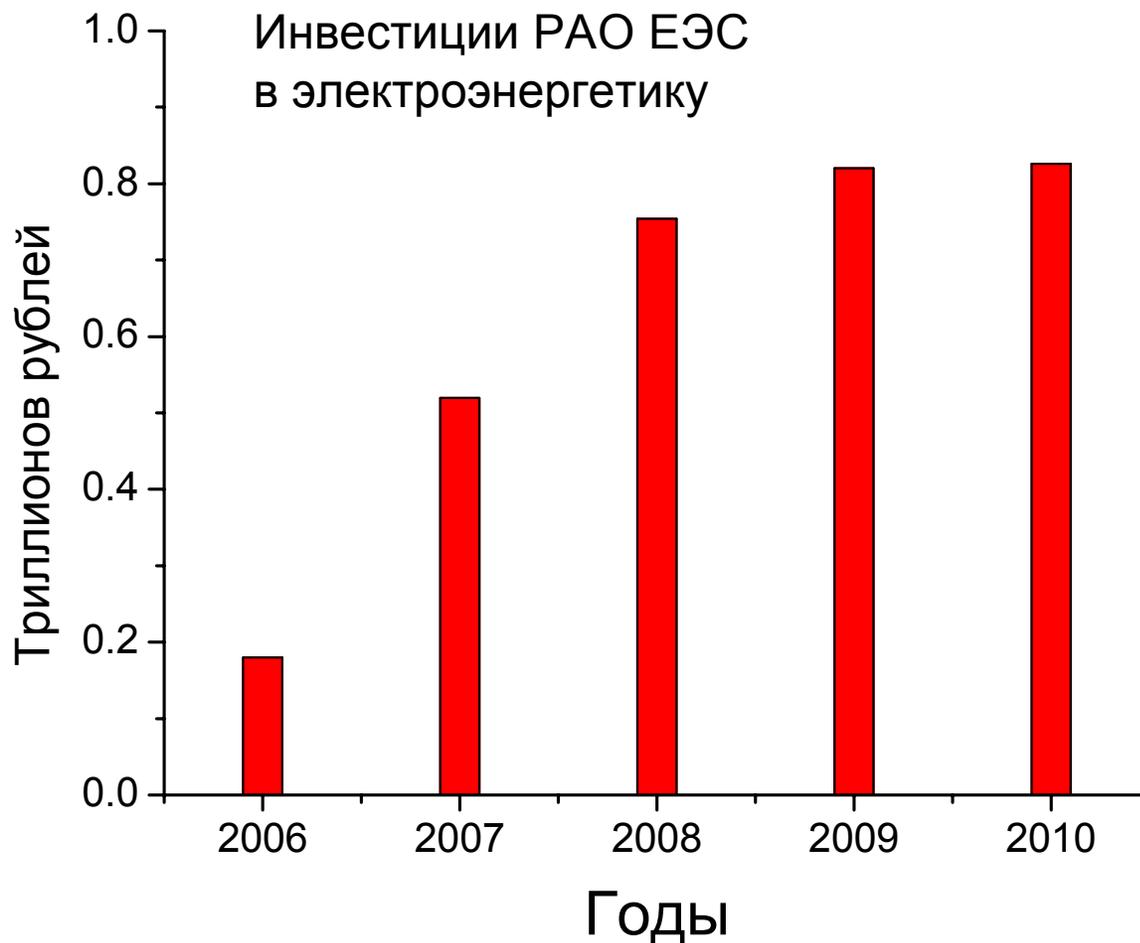
Затраты на электроэнергию составляют 25-30% от всех энергетических затрат

В России установленная мощность производства электроэнергии равна примерно 200 млн кВт.= 200 ГВт

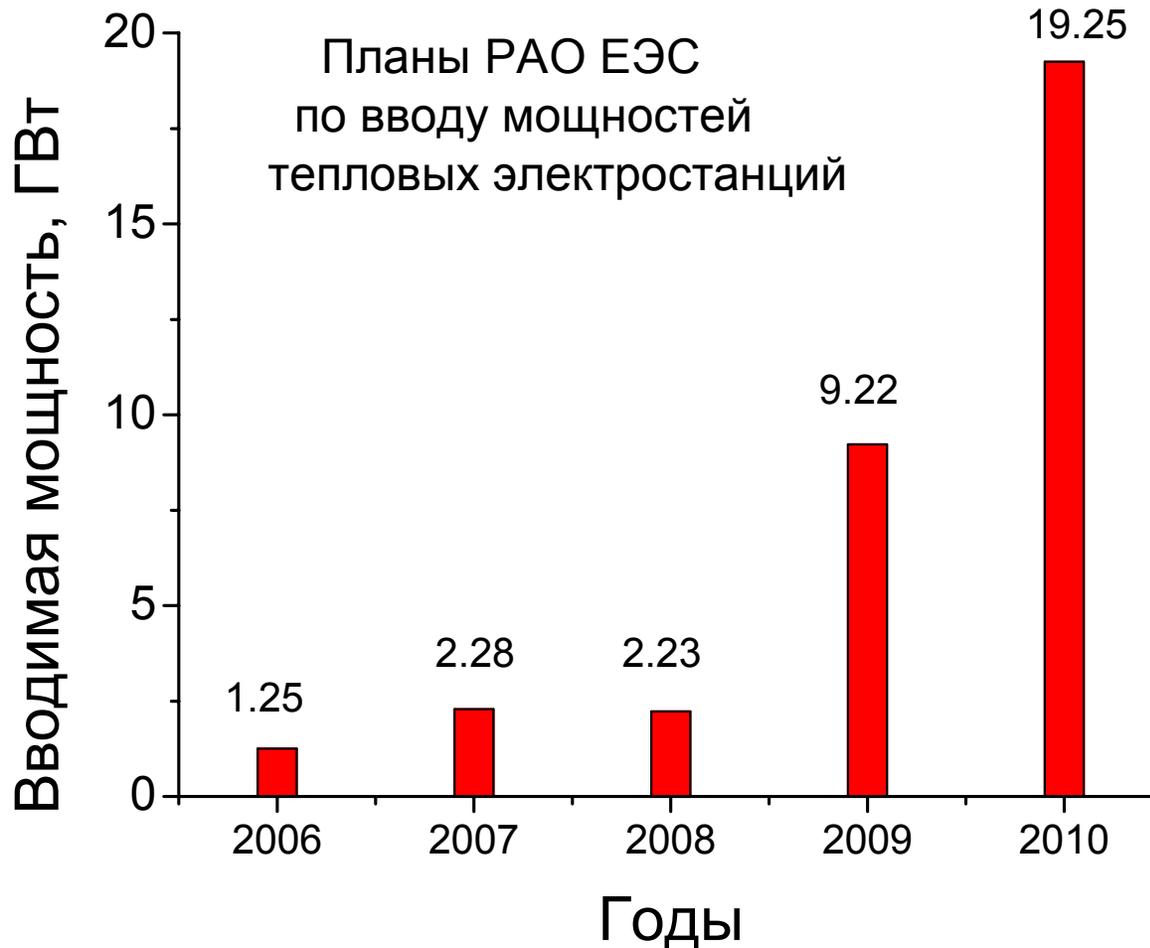
Это - чуть больше одного киловатта на душу населения.

Типичная мощность блоков на современных электростанциях равна 1 млн кВт = 1 ГВт.

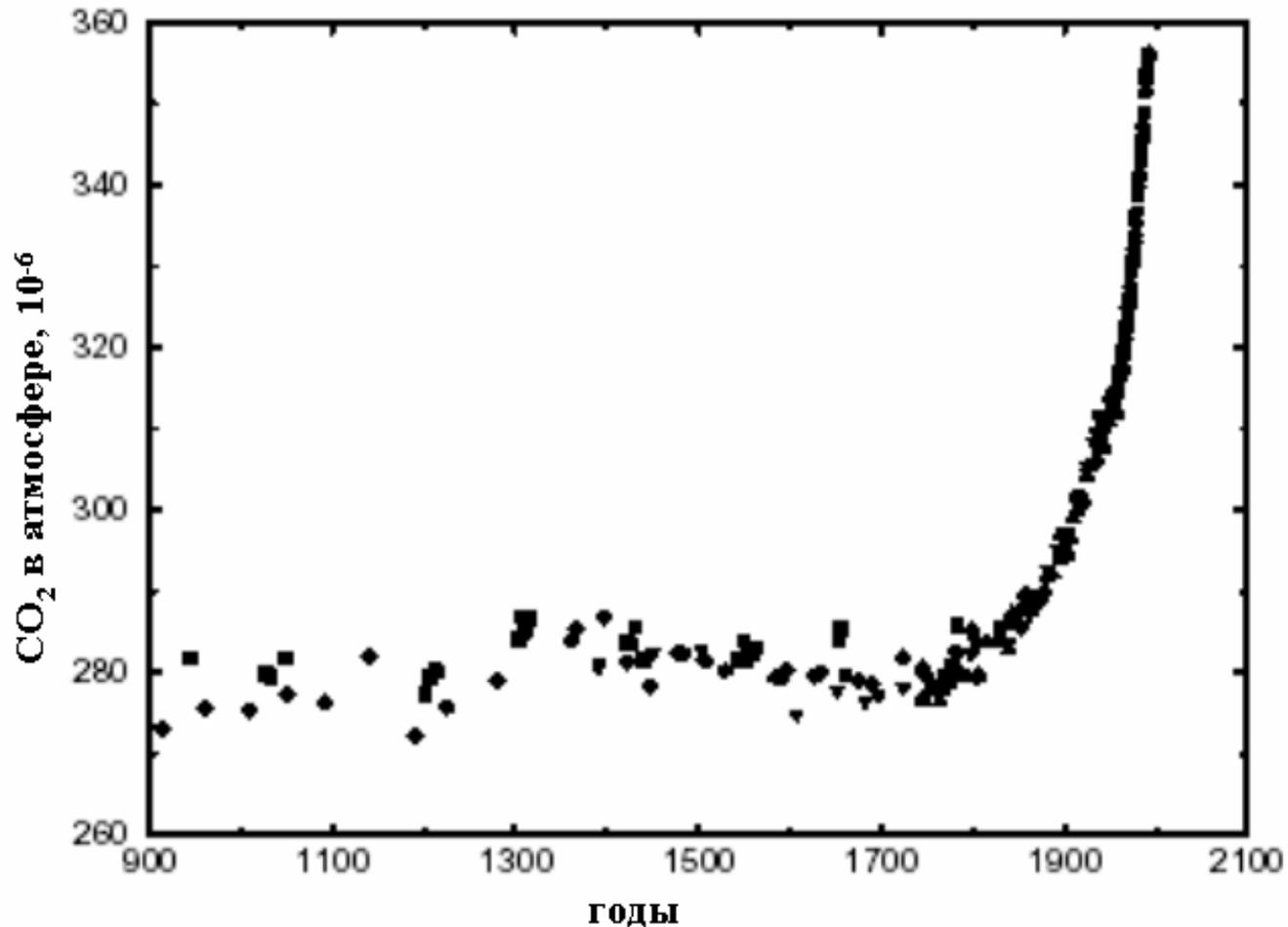
# Инвестиции в электроэнергетику России



# Ввод мощностей тепловых электростанций (в 1985 г. введено 8.9 ГВт)



К чему ведет сжигание топлива?  
К росту содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере



# Хотелось бы

Перевести производство энергии на возобновляемые источники:

Солнце - термобатареи; продукты растениеводства и животноводства, переработанные на топливо;

Воздух - ветряные установки;

Вода - ГЭС, приливы.

Земля - использование внутреннего тепла Земли

# Сколько требуется ресурсов на возобновляемые источники энергии

Метод	Инвестиции для блока в 1 млн кВт в год
Солнечные батареи	Около 100 км <sup>2</sup> в Европе
Ветро-электростанции	2500 станций по 400 кВт (лопасти ротора 55 м)
Биогаз	60 миллионов свиней или 800 миллионов цыплят в год
Биоспирт	6200 км <sup>2</sup> сахарной свеклы или 27200 км <sup>2</sup> пшеницы
Бионефть	24000 км <sup>2</sup> рапса
Биомасса	30 000 км <sup>2</sup> леса

## На сколько лет хватит топлива при текущей скорости потребления ?

Топливо	Доказанные извлекаемые запасы (2001)	Срок использования при современной скорости потребления (лет)
Уголь	$0.9 \times 10^{12}$ т	210
Сырая нефть	$1.0 \times 10^{12}$ баррелей*	30-40
Природный газ	$150 \times 10^{12}$ м <sup>3</sup>	60-70
Уран	$2.0 \times 10^6$ т	40-50(современные реакторы) (2400-3000) (реакторы на быстрых нейтронах)

Что остается ?

Атомная энергетика

и

Термоядерный  
синтез

# Что в будущем ?

Метод	Годовой расход топлива на 1000 МВт эл. (одна типичная современная электростанция)
Уголь	2 700 000 тонн
Нефть	1 900 000 тонн
Деление	28 тонн $UO_2$
Синтез	100 кг D и 150 кг T

Но что можно реализовать?

# Атомная энергетика

Проблемы:

1. Где взять топливо ( $U^{235}$ ) ?
2. Куда девать отходы ?
3. Безопасность.
4. Перспективы: ближние и дальние.

## (1). Топливо.

В природе доля  $U^{235}$  составляет 0.7% от всего урана.

Остальное (99.3%) -  $U^{238}$ . Современные реакторы на медленных нейтронах (РМН) используют только  $U^{235}$ .

**В России добыча урана в 2004 году 4 тыс. т, потребление 10 тыс.т.**

Но и  $U^{235}$  используется только на одну треть!

В ТВЭЛах (тепловыделяющих элементах) содержание  $U^{235}$

в начале кампании ~ 3 – 5 %, через три года в конце кампании ~ 2-3%.

После этого 20-30 лет выдержки с оставшимся, но пока недоступным  $U^{235}$ .

Но и после этого срока доля перерабатываемых ТВЭЛов пока невелика. Они «висят» в прудах возле АЭС.

## (2). ОТХОДЫ

Выдерживать твэлы (тепловыделяющие элементы) 30 лет.

Потом

### **(а) Продукты деления.**

отделять, остекловывать и хоронить. Пока отрабатываются технологии. Но здесь (специалисты говорят), что особых проблем нет.

Продукты активации стенок («отходы» - металл, графит) - хоронить.

### **(б) Оставшееся топливо (Уран 238, 235 и плутоний 239)**

Выделять и пускать в оборот во второй раз.

### **(в) Высшие актиниды (очень большие времена полураспада)**

Выжигать либо в атомных реакторах, либо в термоядерных реакторах

(3) Безопасность :

Реакторы нового поколения.

Но это удорожает стоимость реактора:

Было – 1 млрд.долл. за блок 1 млн.кВт.

Теперь – 1.5 млрд. и более.

## 4. Перспективы ближние

В ноябре 2006 г. принята Федеральная Целевая Программа по развитию атомной энергетики на 2007-2017 г.г.(РМН).

Ассигнования:

**2007 – 2015 – 23 млрд. долларов.**

**2007 –( в бюджете) – 18 млрд. рублей (0.7 млрд. долларов).**

Далее цитирую Кириенко:

«В рамках Программы мы должны, начиная с 2007 года закладывать по 2 новых энергоблока в год. После 2015 года надо выходить на строительстве 3-х новых блоков ежегодно.

Пришло время выполнять решения XXVI съезда партии, хотя и пришлось немного подождать».

## 4. Перспективы дальние.

Переход на реакторы с быстрыми нейтронами (РБН), где делится также и  $U^{238}$ . Возможен равновесный режим, когда  $U^{235}$  в твэлах заменяется плутонием.

**«Старая стратегия»** - на 10 РМН – 1 реактор типа РБН для обеспечения плутониевым топливом вместо  $U^{235}$  топлива.

Однако, плутоний легко выделить из такого топлива – опасность распространения атомного оружия.

**«Новая стратегия»** (пока только обсуждается) – переход на экономичные РБН с равновесным режимом. Таких пока нет.

РБН-600 – работает, РБН-800 – много лет строится.

Медленно идет проект БРЕСТ.

**Тогда топлива хватит на тысячи лет.**

# Термоядерный синтез

# Что такое термояд ?

Возможные ядерные реакции слияния.

D - дейтерий, T - тритий.

Самая доступная реакция



**Проблемы:**

- Трития в природе нет.

- Требуется температура

T = 100-150 млн градусов (10-15 кэВ)

**В центре Солнца – 20 млн градусов.**

Другие реакции:  $D + D = {}^3\text{He} + N$



Но требуется 500 млн градусов (50 кэВ).

Почему выбрана D-T реакция ?

# Условия на токамак-реактор

## 1). Удельная мощность выделения энергии

$$P = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle E > 2 \text{ [W/cm}^3 = \text{MW/m}^3]$$

$n_1$  и  $n_2$  - плотности компонент плазмы,

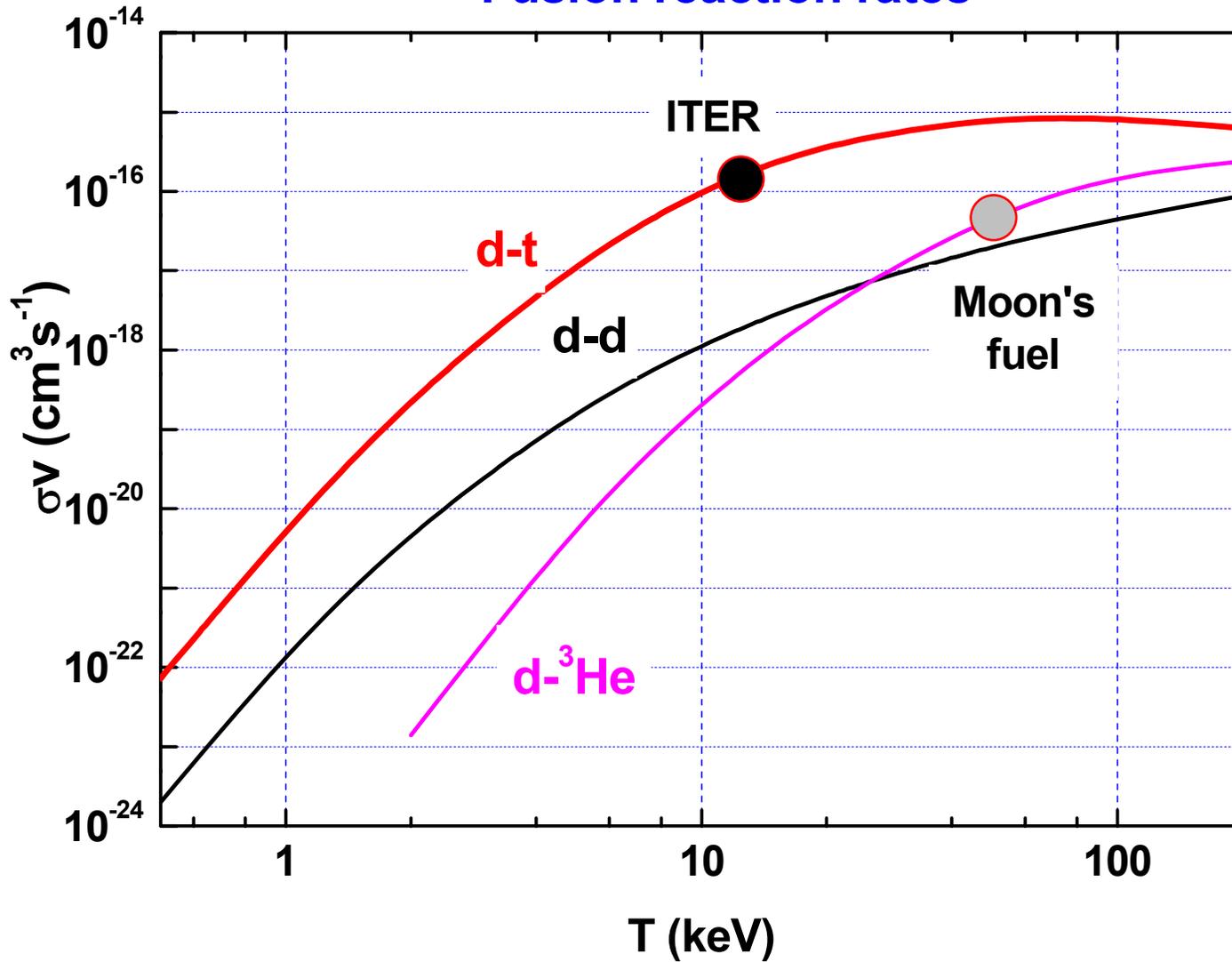
$\langle \sigma v \rangle$  - скорость реакции,

$E$  - выделение энергии на один акт реакции (17 - 18 MeV).

## 2). Устойчивость плазмы

$$\frac{3}{2} (n_1 + n_2)(T_i + T_e) / (B^2/8\pi) < 0.05$$

# Fusion reaction rates



# Какое магнитное поле требуется ?

Для **D-T** реакции

$$n_D = n_T = 0.6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}.$$

Магнитное поле  $B_t = 6 \text{ T}$  на оси плазмы.

Оно спадает по радиусу, как  $1/R$ .

Это означает, что **на сверхпроводнике будет 12 T.**

При этом условия 1) и 2) выполняются.

Для **D -  $^3\text{He}$**  реакции.

Для выполнения условия 1):

Температура  $T$  должна быть в 4 раза больше,

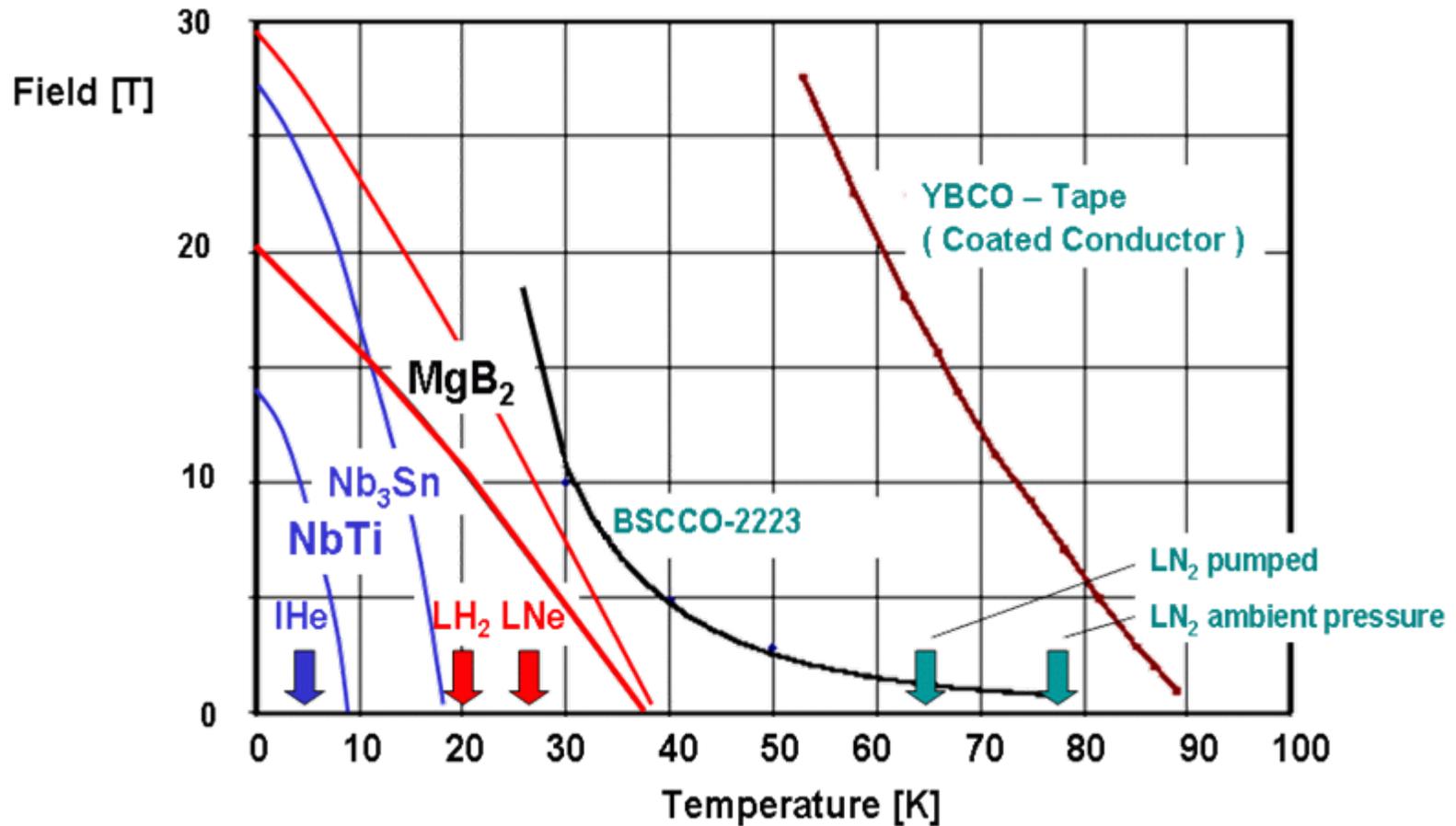
Плотность  $n$  в 2 раза больше, т.е. давление должно быть в 8 раз больше.

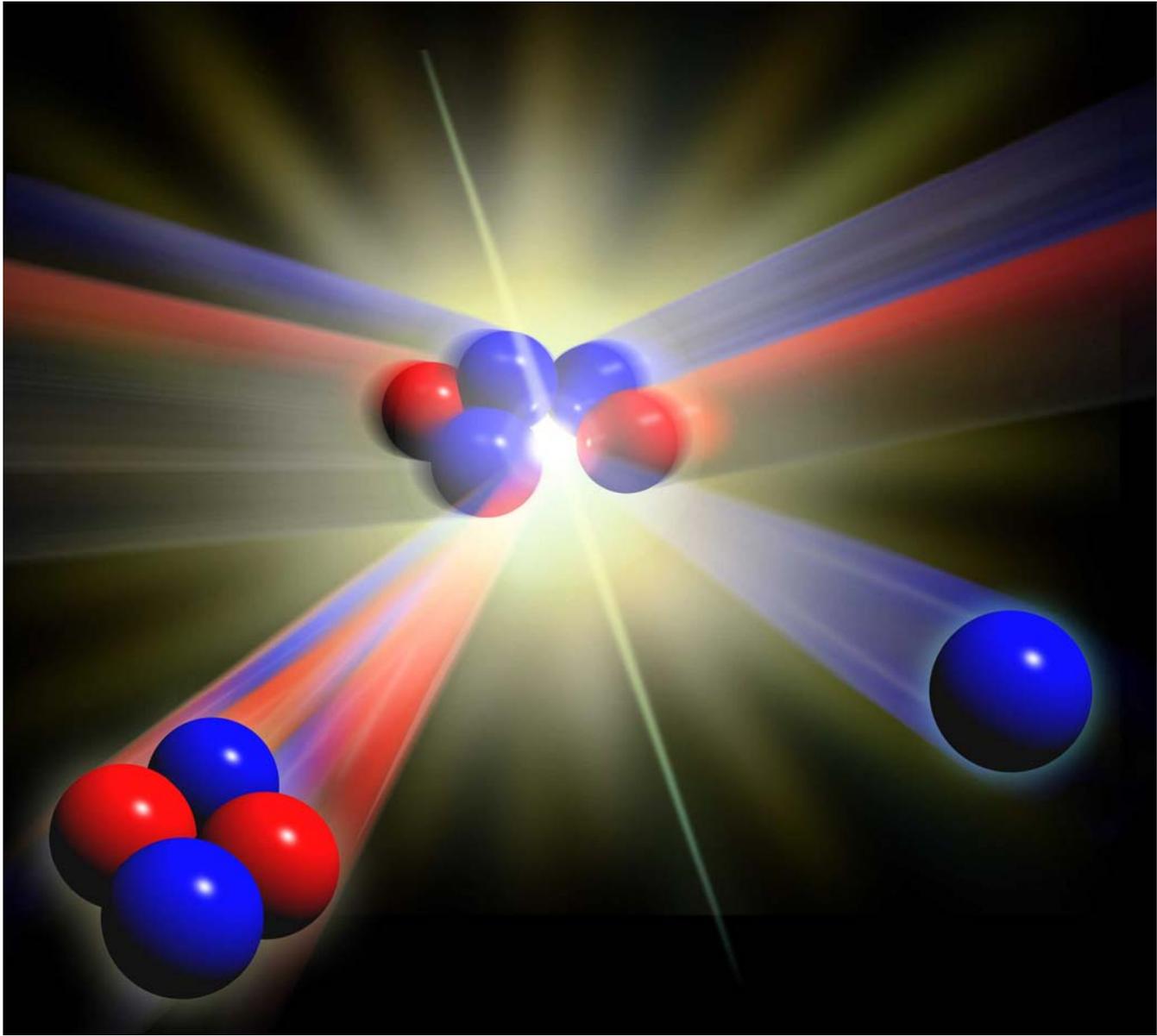
Для выполнения условия 2) магнитное поле  $B_t$  должно быть

в 2.5 раза больше, т.е. **на сверхпроводнике должно быть**

$$B_t = 30 \text{ T}.$$

# Свойства современных сверхпроводников





# Откуда взять тритий ?

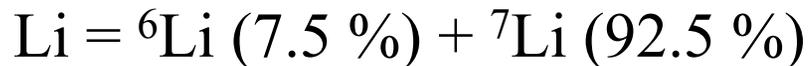
Трития в природе нет, у него период полураспада – 12 лет.  
**Поэтому его нужно сделать в самом реакторе.**

${}^6\text{Li} + \text{N} = \text{He} (2 \text{ MeV}) + \text{T}(2.7 \text{ MeV})$  – реакция с выделением энергии.

На сколько лет хватит запасов  
дейтерия и лития по уровню  
потребления энергии в 1995 году.

D	на 100 млрд лет
Li (в земле)	на 3000 лет
Li (в океане)	<b>на 60 млн лет</b>

Состав природного лития



## Краткая история «термояда» (УТС).

1950 - Тамм и Сахаров - первые оценки для реактора.

1958 – токамак, стелларатор.

1968-69 –  $T = 1$  кэВ в токамаке Т-4 (СССР).

1975-1980 – второе поколение токамаков (Т-10, PLT).

1983-2006 – третье поколение токамаков – 8 штук  
(JET, ASDEX-U, Tore-Supra (Европа),  
**TFTR**, DIII-D (США), JT-60U (Япония),  
**T-15** (СССР)), EAST (Китай, 2006).

2006 – больше сотни токамаков в разных странах.

1988 – 2002 – проектирование токамака четвертого поколения ITER.

2006- 2016 – строительство ITER.

Соглашение о строительстве подписано 21.11.2006

# Что такое термоядерная плазма?

Основные параметры.

Температура 12-15 кэВ **(120-150 млн.градусов).**

Плотность  $1 - 1.5 \cdot 10^{14}$  частиц/см<sup>3</sup>.

Давление – несколько атмосфер.

Магнитное поле 3 - 6 Тесла.

**(сверхпроводящие обмотки при температуре 4К)**

Ток плазмы в токамаке 3 МА (JET), 15 МА(ITER)/

Напряжение на обходе токамака 0.1 – 0.2 вольта.

**(Какое чудовищно низкое сопротивление !!!**

**$R = U/I < 10^{-8}$  ом)**

# Что такое токамак ?

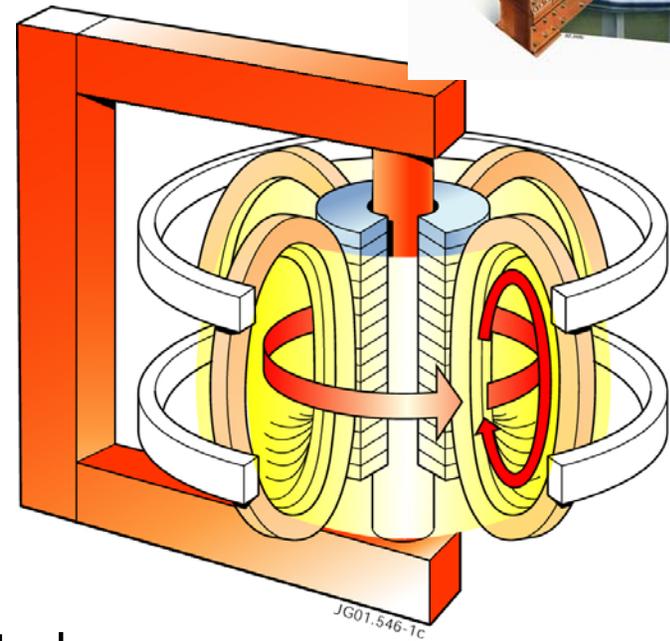
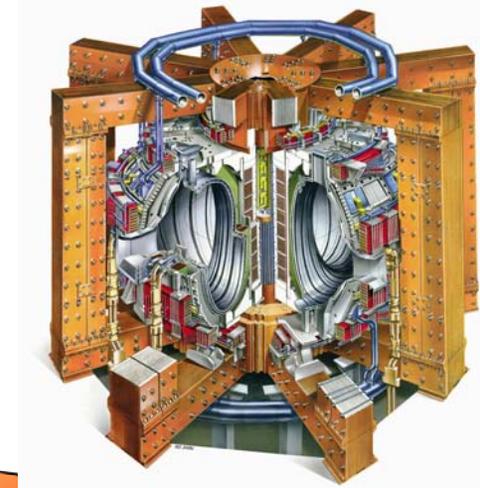
Это **Т**Ороидальная **К**амера с **М**агнитными **К**атушками

(И.Н.Головин ~1956 г.)

# • What is the TOKAMAK ?

A **tokamak** is a toroidal plasma confinement device with:

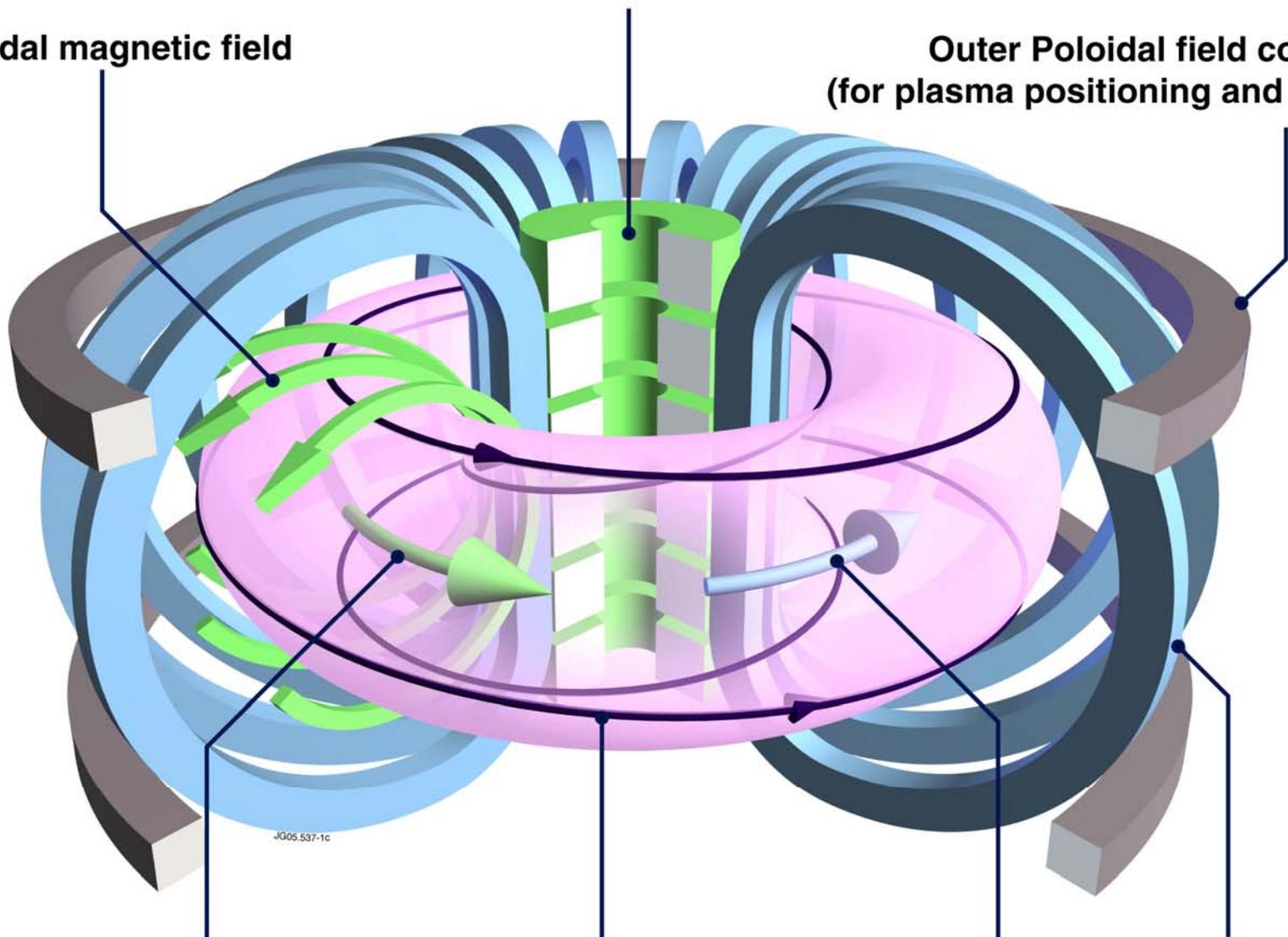
- **Toroidal Field coils** to provide a **toroidal magnetic field**
- **Transformer** with a **primary winding** to produce a **toroidal current** in the **plasma**
- The current generates a **poloidal magnetic field** and therefore twisted field lines which creates a perfect “trap”
- Other coils **shape** the plasma



Inner Poloidal field coils  
(Primary transformer circuit)

Poloidal magnetic field

Outer Poloidal field coils  
(for plasma positioning and shaping)



JG05.537-1c

Resulting Helical Magnetic field

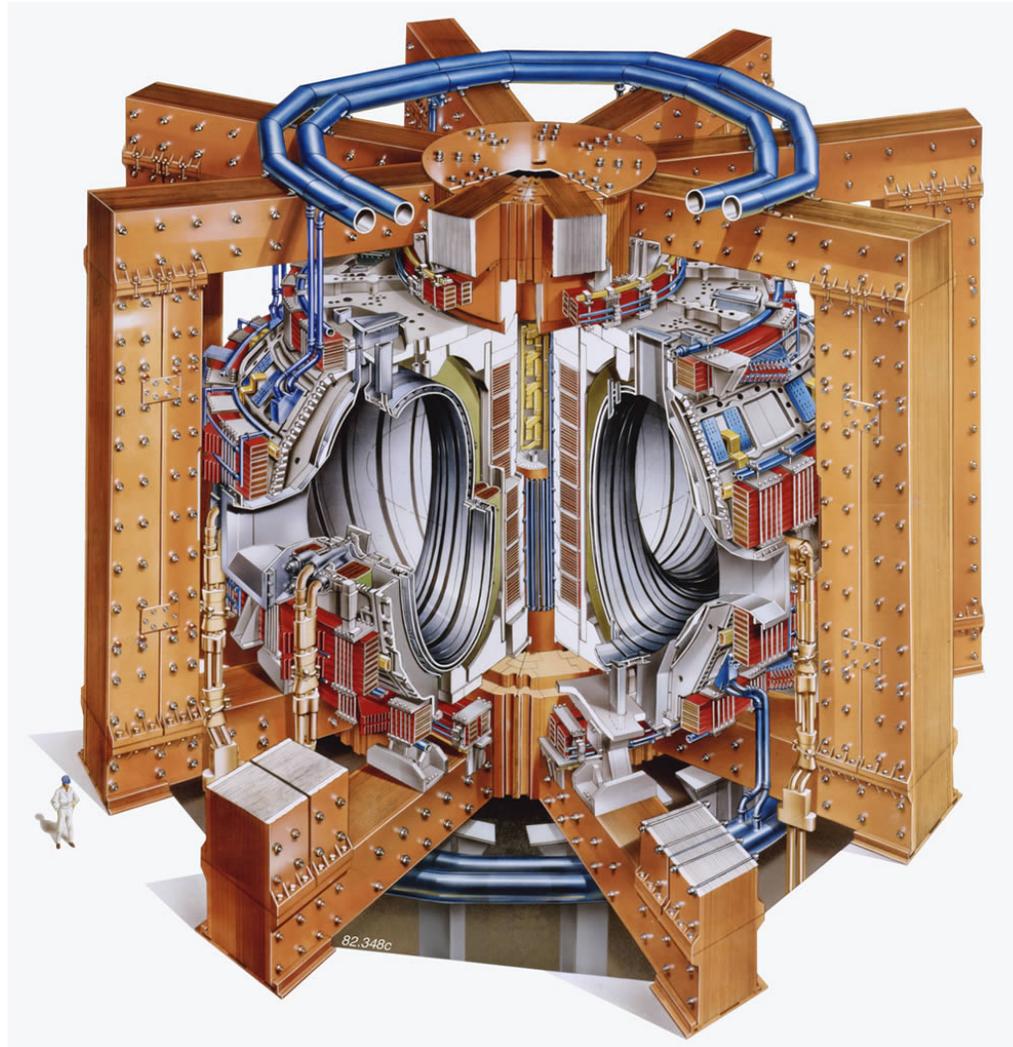
Toroidal field coils

Plasma electric current  
(secondary transformer circuit)

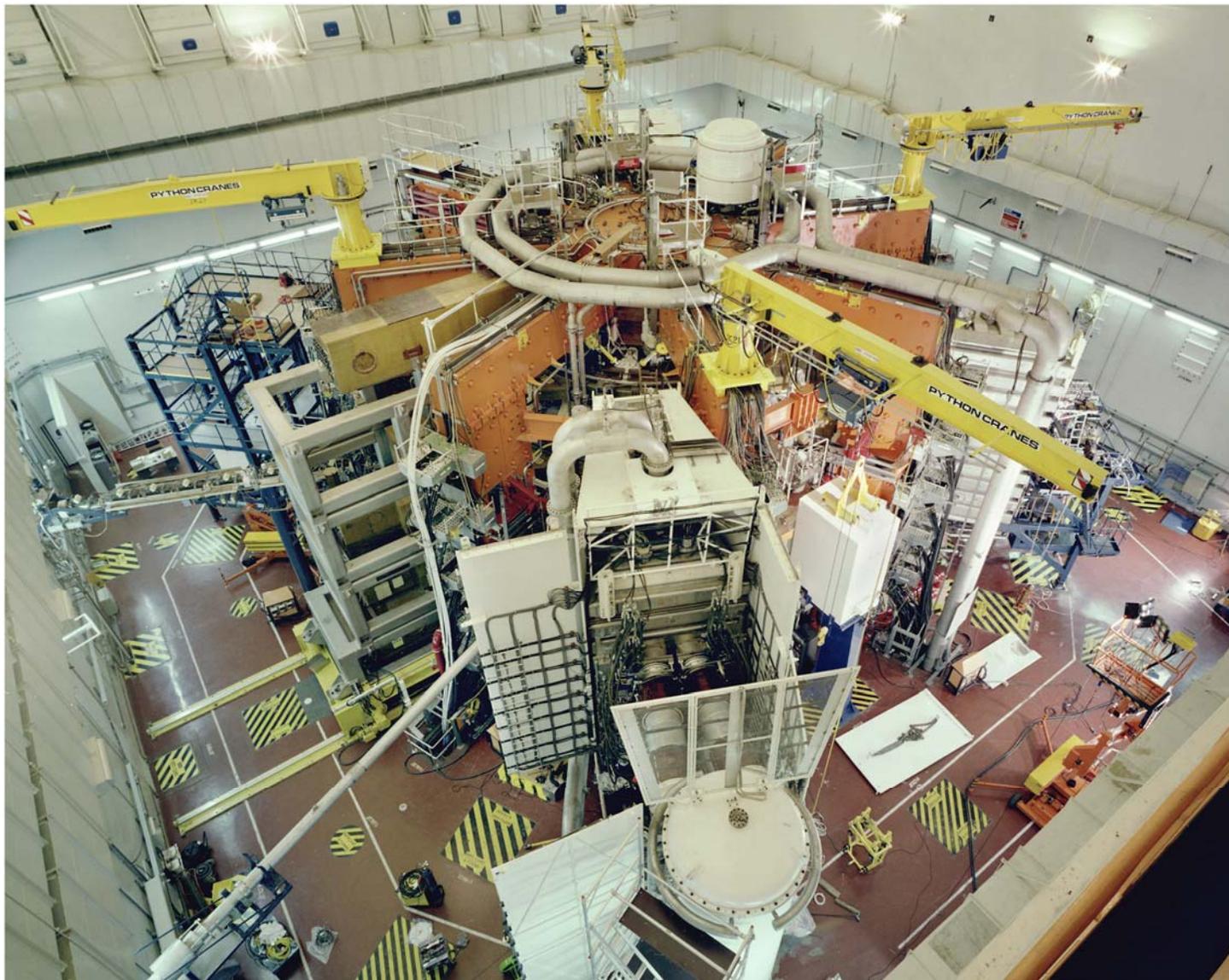
Toroidal magnetic field

# Европейская установка JET

## Самая крупная в мире



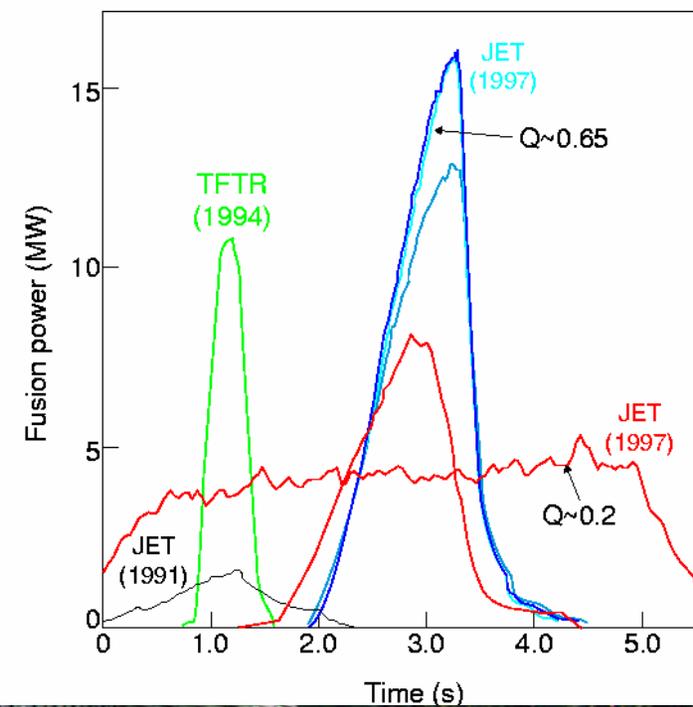
# JET, ОБЩИЙ ВИД



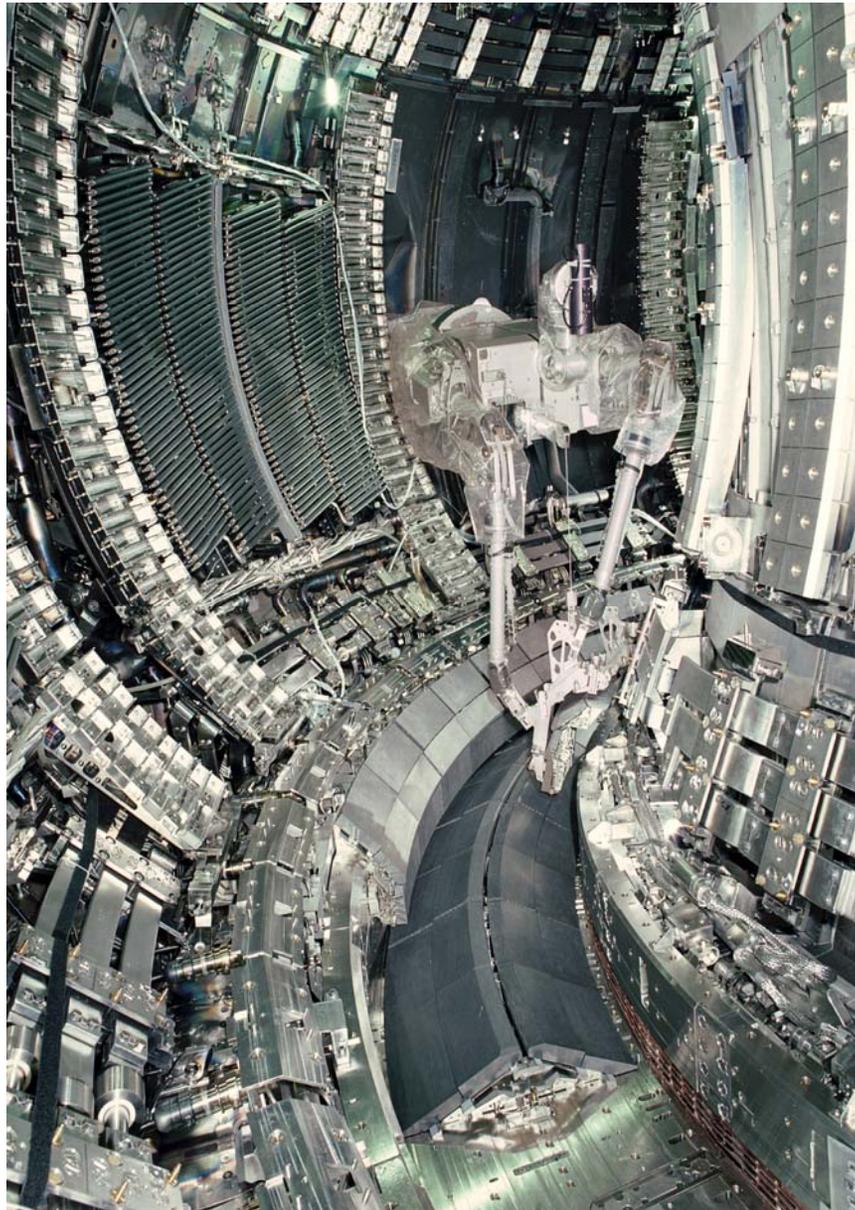
# Progress on JET

## (Joint European Torus)

JET parameters:  
 Major radius 3m  
 Minor radius 1m  
 Plasma height 3.5m  
 Plasma current 3MA  
 Toroidal B = 2.7T



# Рука – робот внутри камеры JET



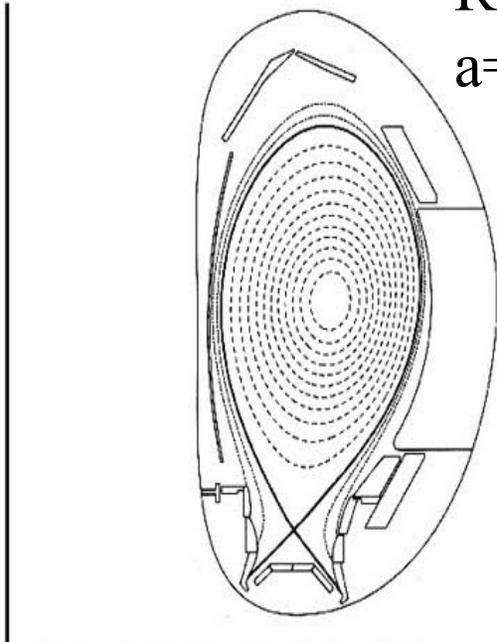
# Поперечные сечения камеры и плазмы в токамаках

**ASDEX-Upgrade** in Germany

$$R/a = 3$$

$$R = 1.67\text{m},$$

$$a = 0.5\text{m}$$

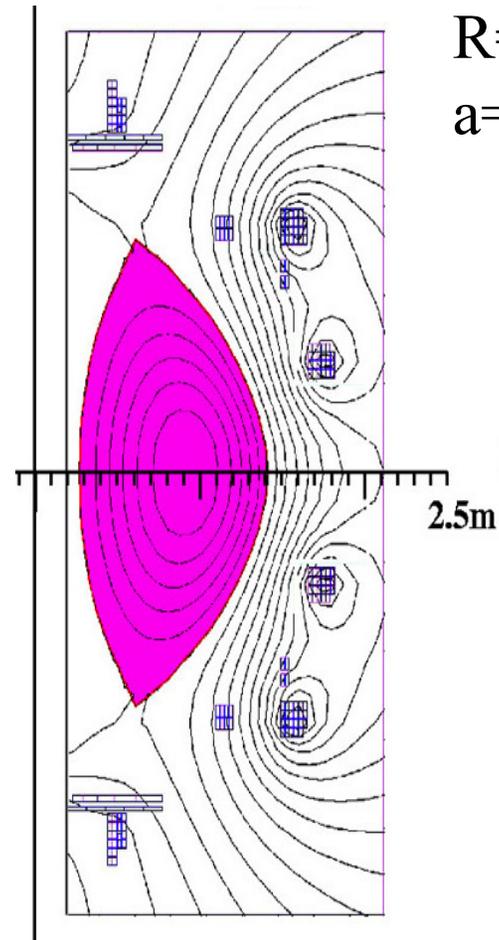


**MAST** in UK

$$R/a = 1.4$$

$$R = 0.8\text{m},$$

$$a = 0.55\text{m}$$



# Средства нагрева плазмы

1. Омический нагрев током (Т порядка 1 – 5 кэВ)
2. Нагрев пучком горячих нейтралов.  
Энергии частиц 50 – 300 кэВ сейчас, 1 МэВ в ITER  
Мощность пучков 10 – 30 МВт(сейчас), 50 МВт в ITER.
3. Нагрев электромагнитными волнами.  
СВЧ волны (гиротроны), 110-170 ГГц  
(длина волны 3-1.8 мм).  
Нижегибридные волны, 2-4 ГГц.  
ВЧ волны, 20-50 МГц

# 170-ГГц ГИРОТРОН ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР

Депресс-коллектор со свипированием электронного пучка

Окно вывода энергии:

Поликристаллический алмазный диск: толщиной 1,85 мм и диаметром 106 мм

Окно вывода паразитного СВЧ излучения диаметром 102 мм из нитрида бора

Преобразователь моды:

Профилированные зеркала обеспечивающие содержание 98% гауссовой моды в выходном излучении

Подстраиваемое выходное зеркало

Резонатор: расчетная рабочая мода генерации  $TE_{25.10.1}$

Криомагнит с 160 мм «тёплым» отверстием

Электронная пушка – диодного типа

Металло-пористый катод

Все внутренние поверхности изготовлены из меди и обеспечены водяным охлаждением необходимым для работы в непрерывном режиме на уровне выходной мощности 1 МВт.

**ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ:**

Получены следующие режимы с  $P_{СВЧ}$  в гауссовой моде: 0,5-0,55 МВт/100сек; 0,85 МВт/20сек; 1,0 МВт/1сек, ограничения длительности импульса определяются СВЧ пробоями в нагрузке.

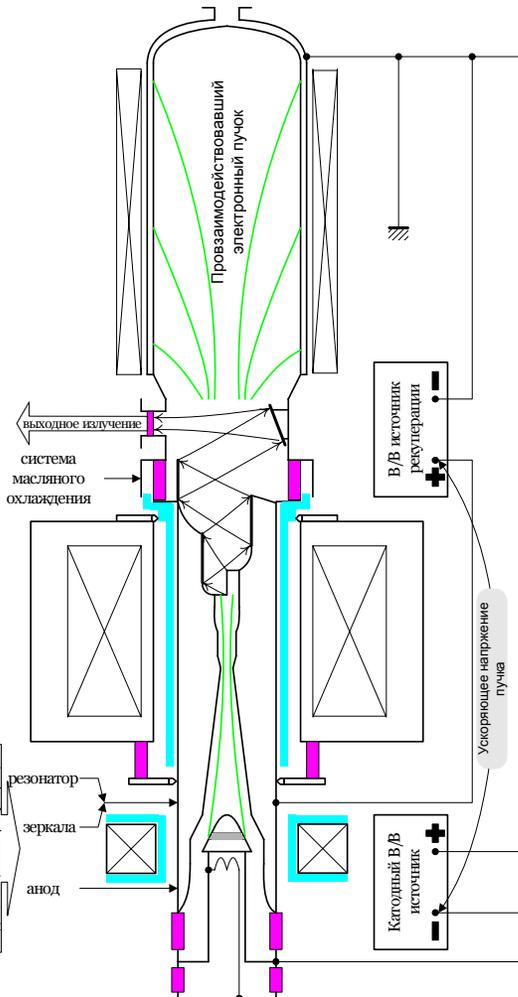
Разрабатывается проект создания вакуумной нагрузки.

Завершается создание непрерывного высоковольтного источника мощностью 4 МВт.

Испытан макет гиротрона с рабочей модой генерации  $TE_{28,12,1}$  при длительности импульса 0,1сек на уровне выходной мощности в гауссовой моде

**1,5 МВт.**

Испытания продолжаются.



# Диагностики

## Что надо измерять?

Токи и напряжения.

Магнитные поля вне плазмы.

$T_i$ ,  $T_e$ ,  $n(r,t)$ ,  $n_{imp}$ , скорости вращения плазмы.

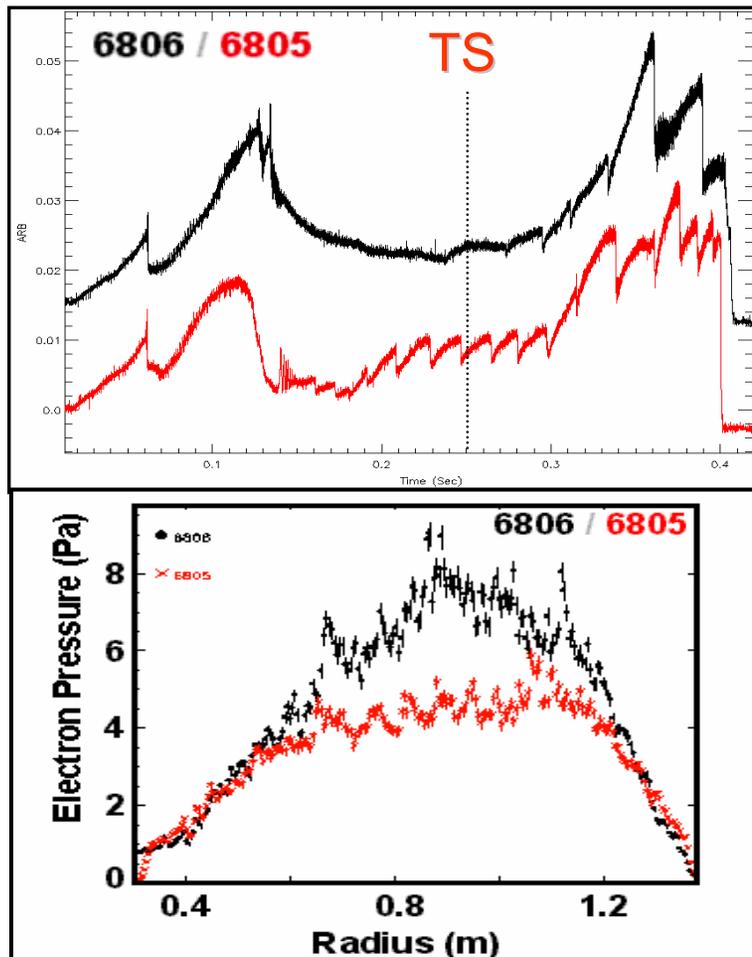
Потоки частиц (обзорное и коллимированное)  
(нейтронов, нейтралов),

Электромагнитное излучение в различных частях спектра:  
(мягкий и жесткий рентген, ультрафиолет,  
оптический диапазон, инфракрасное излучение,  
радио диапазон), спектры, линии

Пассивные и активные методы.

На всякой уважающей себя установке 25 – 30  
диагностик

# Эксперименты на установке MAST (Англия).



Поведение сигналов мягкого рентгена во времени.

До 100 пространственных каналов.

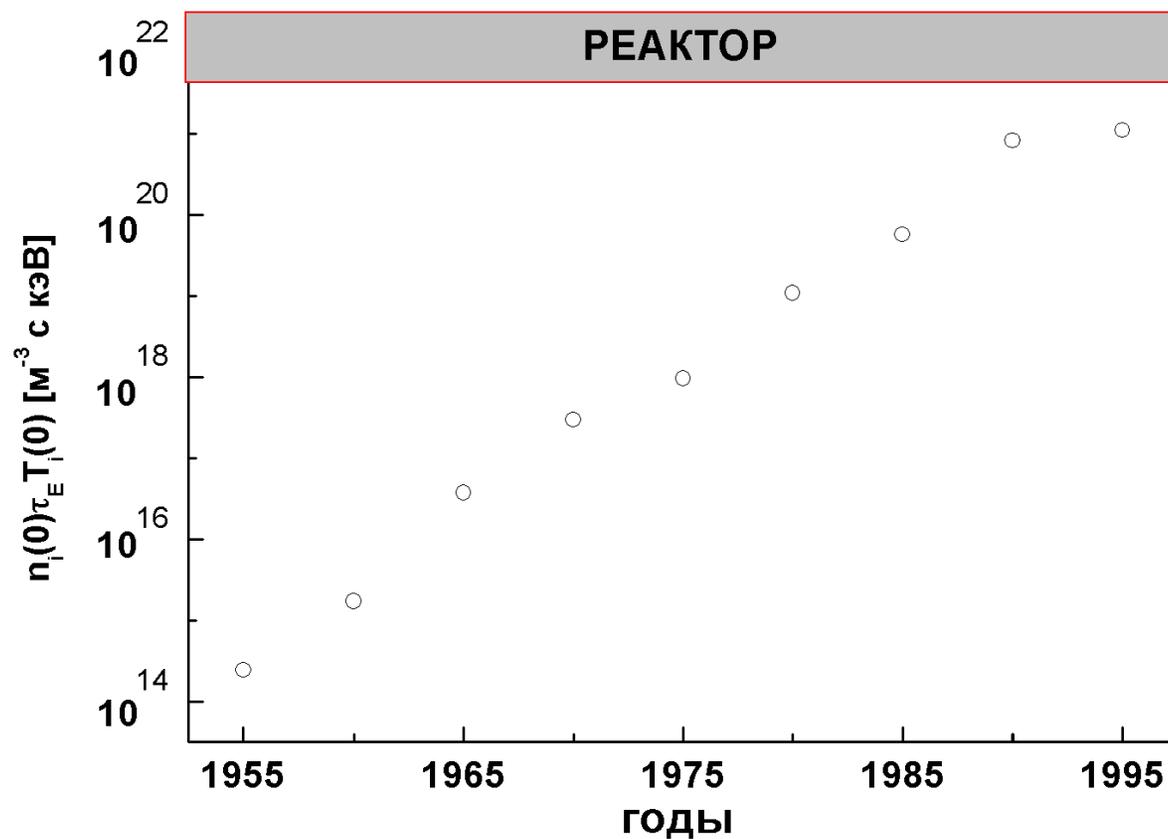
Профили давления электронов в двух разрядах:  $p = nT_e$

Одновременные измерения температуры и плотности в 300-тах точках по радиусу

Прогресс в термоядерных исследованиях.

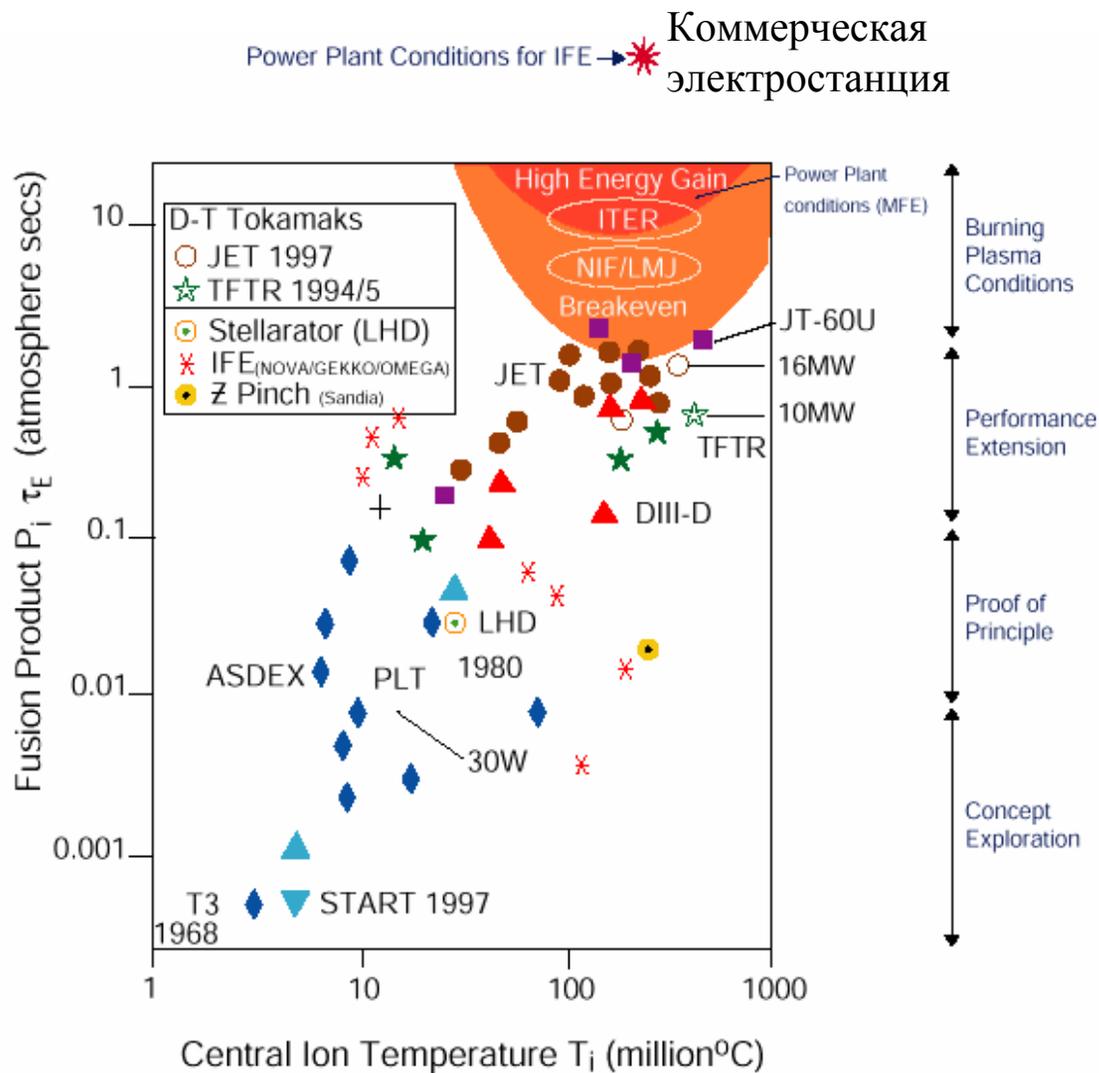
Рост произведения  $n(0) \tau_E T_i(0)$  в установках токамак

$\tau_E = \text{энергозапас} / \text{вкладываемая мощность}$  .

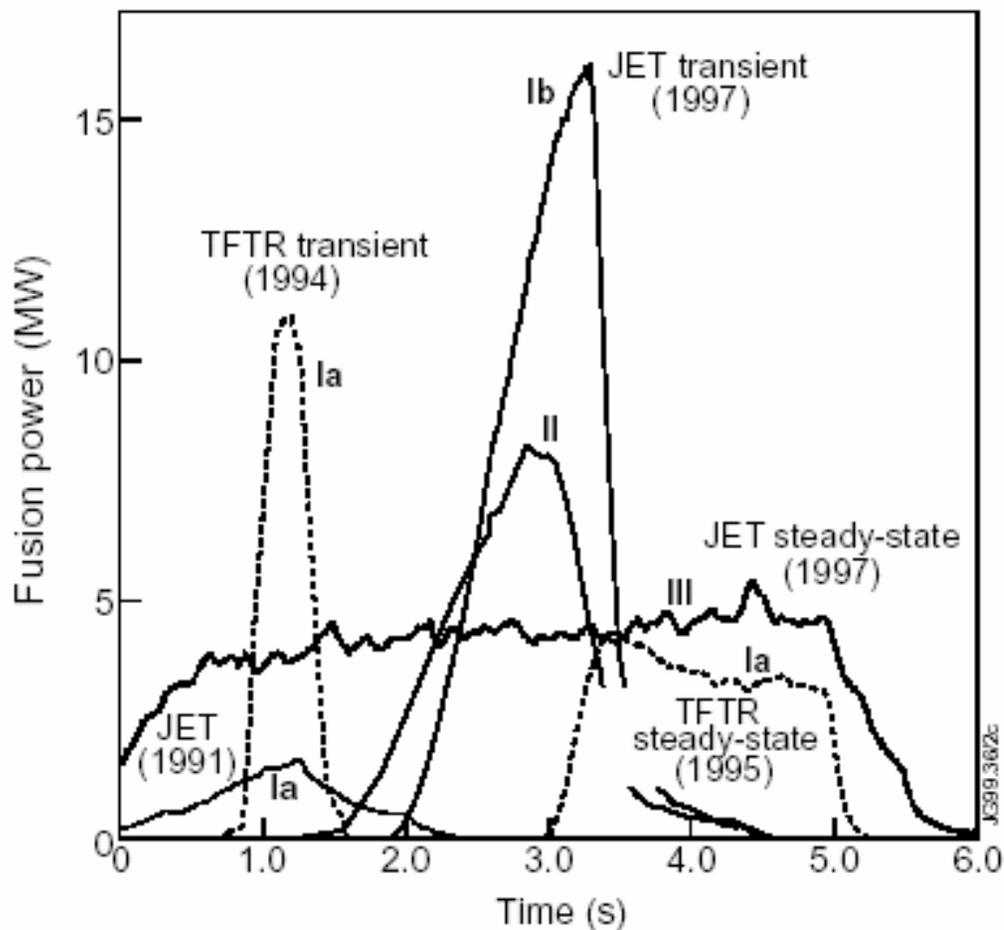


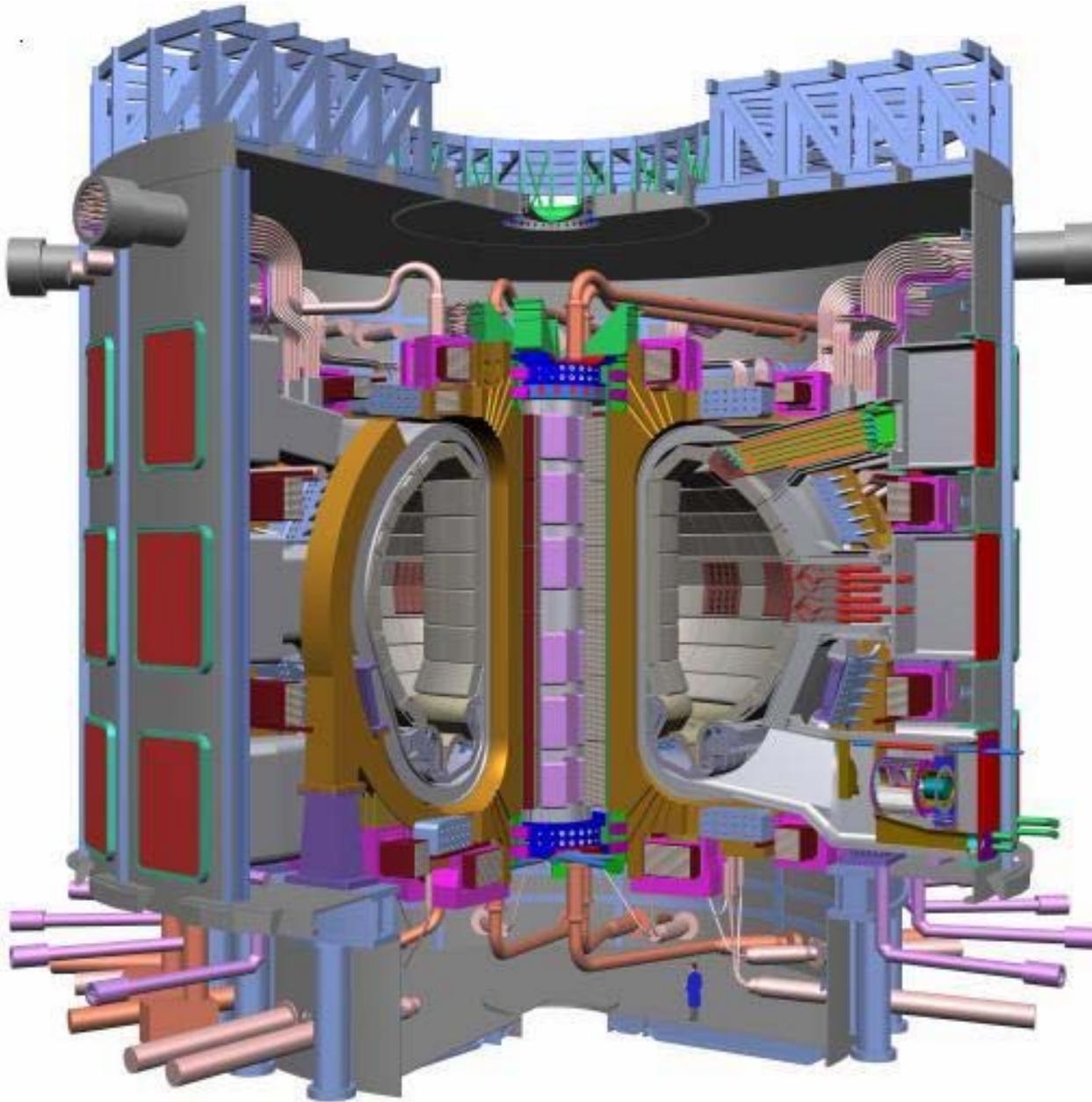
ITER

# Еще одна картинка прогресса в исследованиях по термояду



# Выход термоядерной мощности в экспериментах с D-T плазмой на установках JET (Европа) и TFTR (США)





## ITER

$$T = 12-15 \text{ keV}$$

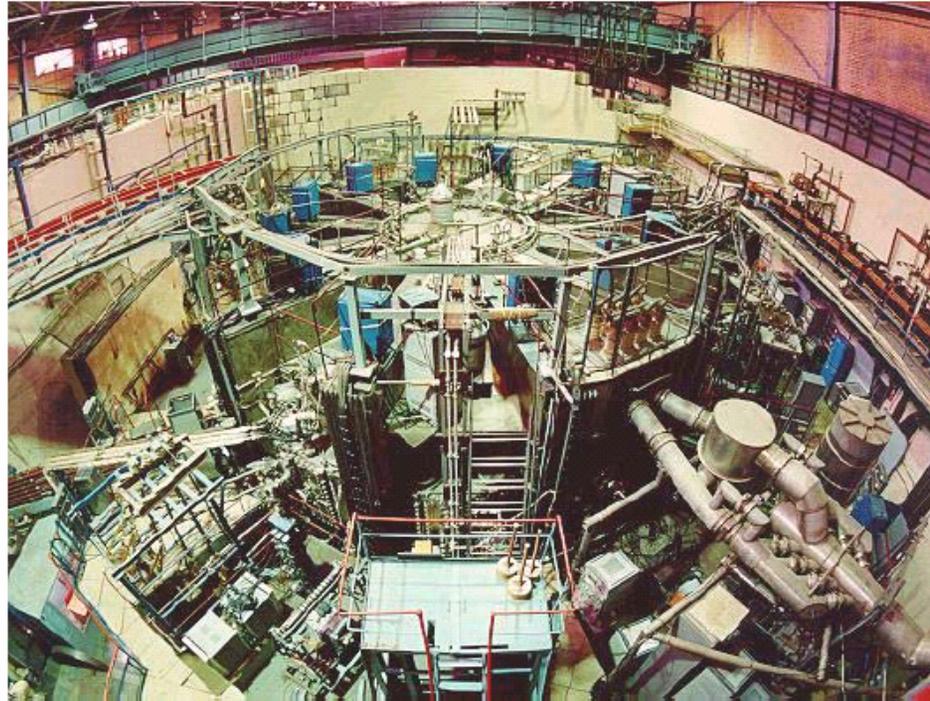
$$n = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$B = 5.8 \text{ T}$$

$$\Delta t = 30 \text{ min}$$

$$P_{\text{DT}} = 0.5 \text{ GW}$$

$$Q = P_{\text{DT}} / P_{\text{dep}} = 10$$



*FIG. 1. Tokamak T-15.*

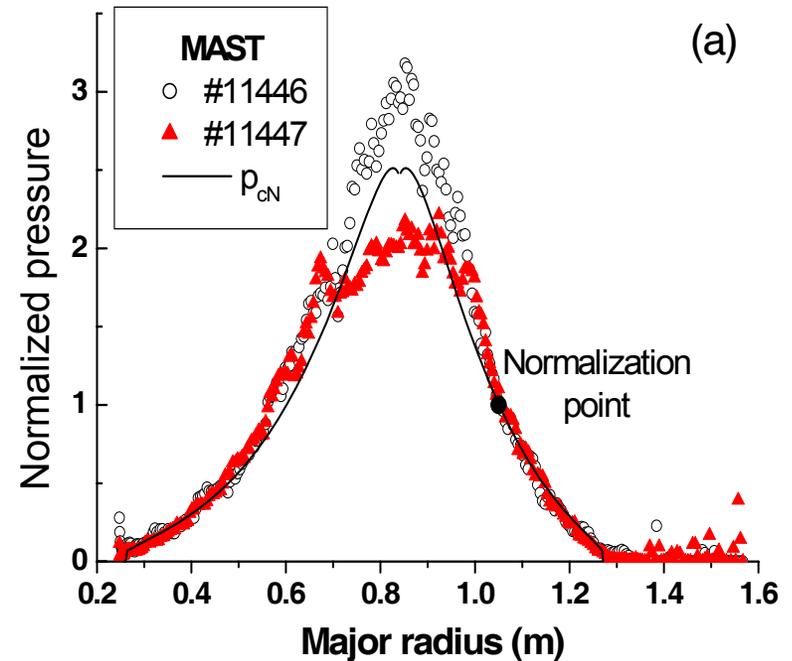
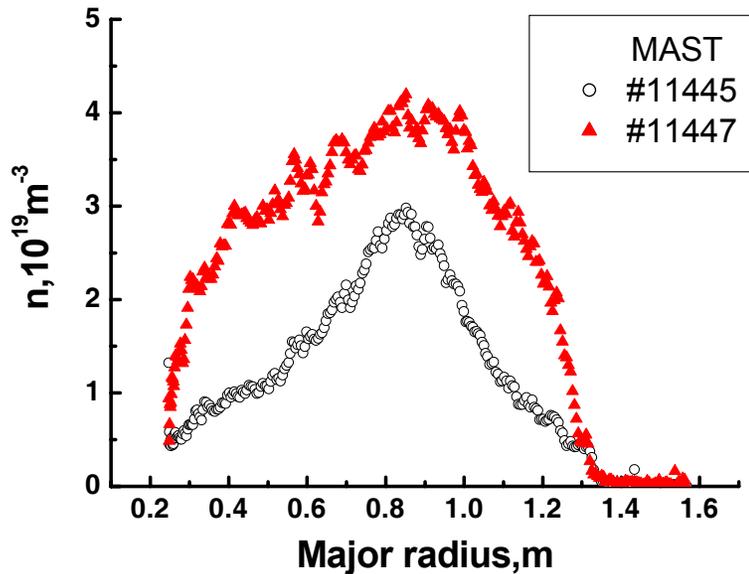
TABLE 1. DESIGN AND ACHIEVED PARAMETERS OF THE TOKAMAK T-15 (LIMITER CONFIGURATION).

<b>Parameter</b>	<b>Design</b>	<b>Achieved</b>
Magnetic field, T	3.5	3.6
Plasma current, MA	1.4	1
Pulse duration, s	5	1.5
NBI, MW	6	0.6
ECRH, MW	5	1.5

Успехи исследований на токамаках обязаны прежде всего **самоорганизации** плазмы.

Что это такое ?

Профили давления плазмы не зависят от вкладываемой мощности и плотности плазмы.



## Языки для описания процессов в плазме.

Плазма – среда с большим количеством характерных времен.

Движение частиц  $\tau = 10^{-11} - 10^{-8}$  сек

Кинетические процессы  $\tau = 10^{-5} - 10^{-3}$  сек

Магнитогидродинамические процессы  $\tau = 10^{-6} - 10^{-5}$  сек

Перенос тепла и частиц (именно здесь развиваются процессы самоорганизации)

$\tau = 10^{-3} - 10^0$  сек

Что удивительно –

плазма – открытая система, но к ней применимы некоторые вариационные принципы, которые позволяют определить само-организованную форму параметров плазмы.

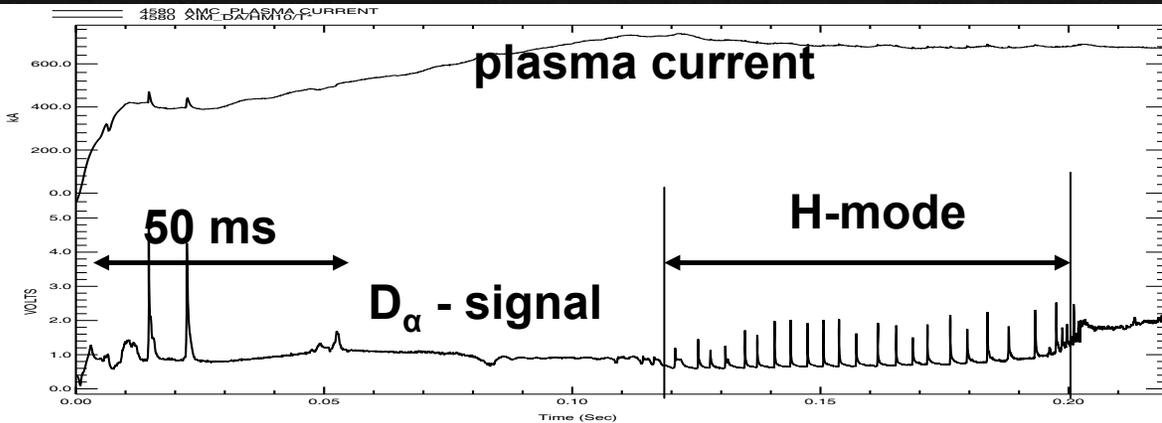
**Из хаоса рождается порядок.**

# H-mode and ELMs:

movie from MAST shot

00004580

```
FRAME NO
00008
TIME SEC
000.
00311111
REC RATE
2250
ID NO 1
PLAYBACK
PLAY
LIVE
BLOCK
S
E
MULTI
REC MODE
START
READY
REC
```



# Наши планы на будущее

1. Строительство ИТЭРа – 2006 – 2016.
2. Предложение принять федеральную программу по УТС в России (26 млрд. рублей на 2008 –2015).

В этой программе:

- Восстановить Т-15 и организовать целевой российский научный центр.
- Принять участие в работе ИТЭРа.
- Проектирование и строительство международной установки ДЕМО в Японии (окончание строительства 2025 г.)
- Проектирование и строительство в России ПТЭ (Промышленной Термоядерной Электростанции) к 2050 году. .

Это предложение пока правительством не принято

Спасибо за внимание