

Проблемы энергетики и пути их решения.

**Перспективы термоядерной энергетики и
современное состояние исследований в
этой области**

Некоторые проблемы развития энергетики.

В последнее время происходит обострение борьбы за источники сырья, в первую очередь - энергетического

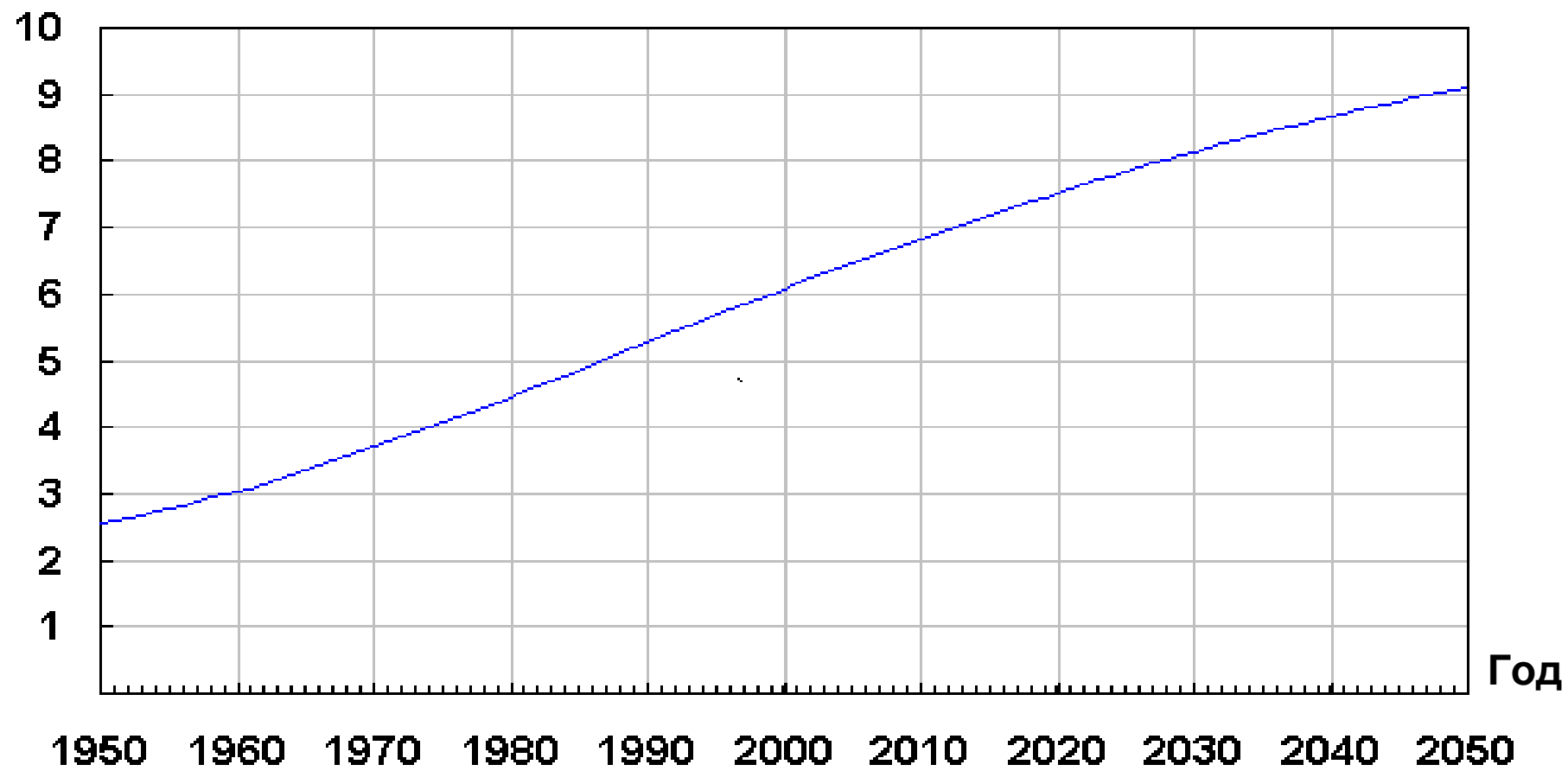
США:

- оккупация Ирака - страны с богатейшими запасами нефти;
- объявлено о создании стратегических запасов нефти в США на уровне 1 млрд. тонн;
- объявлена амбициозная программа освоения ближайшего космоса - Луны и Марса

Китай:

объявил о намерении покупать месторождения нефти по всему миру

Рост народонаселения



Потребности в энергии

Удельные (кВт/чел.)

Страны	кВт/чел
Норвегия	14.2
Канада	13.7
США	11.9
Япония	5.7
Европа	4.7
Бывш. СССР	4.5
Китай	0.84
Индия	0.41
Развив. страны	0.1 – 1
Среднее в мире	2.1

Полное энергопотребление за год

в единицах Q

(1Q = 10^{21} Дж)

0.4 Q (2000 г.)

⇒

1 Q (2050 г.)

Структура мирового энергопотребления

Источник энергии	Вклад, %
Нефть	40
Уголь	22
Природный газ	23
Ядерная энергетика	7
Гидроэнергетика	7
Остальные источники	1

**Ресурсы
возобновляемых
источников
энергии**

Вид энергоресурса	Q/год
Морские приливы	0.014
Энергия ветра	0.04
Гидроресурсы	0.065
Геотермальные ресурсы	1.0
Тепловая энергия морей и океанов	1.8
Солнечная энергетика (0.5%)	10

Ресурсы невозобновляемых источников энергии

Топливо	Разведанные запасы	Потенциальные запасы	Время истощения разведанных запасов, лет
Уголь	10^{12} т	$(4-5) \cdot 10^{12}$ т	270
Нефть	$0.13 \cdot 10^{12}$ т	$0.19 \cdot 10^{12}$ т	40 – 50
Природный газ	$150 \cdot 10^{12}$ м ³	$300 \cdot 10^{12}$ м ³	60 – 70
Уран	$(2-3) \cdot 10^6$ т	$17 \cdot 10^6$ т	40 – 50* 2400 - 3000**

* оценка запасов дешевого урана при выгорании топлива в тепловых реакторах

** - при более глубоком выгорании топлива в реакторах-размножителях

**Количество топлива в год, требующееся для
электростанции мощностью 1000 Мвт (эл.)**

Уголь	2-3 млн. тонн
Нефть	1.5-2 млн. тонн
Реакции деления	≈ 30 тонн
Реакции синтеза	Сотни кг

Влияние на окружающую среду

Образование токсичных и радиоактивных отходов в электростанциях на 1000 Мвт

Вид электростанции	Кол-во топлива в год	Отходы
На органическом топливе (уголь)	2-3 млн. тонн	200-250 тыс. тонн SO_2 200-250 тыс. тонн золы ≈ 100 тыс. тонн окислов азота Мышьяк, хром, ртуть
Атомная станция (на тепловых нейтронах)	≈ 30 тонн	28 тонн (4 м^3) из них 27 тонн м.б. переработано для др. типов реакторов ($26.4 \text{ т } ^{238}\text{U}$, $0.2 \text{ т } ^{235}\text{U}$, 0.2 т Pu) $\Rightarrow$ 1 тонна

Что нас ждет в ближайшем будущем, если...

Из 5.5 миллиардов тонн углерода, выбрасываемых промышленностью в атмосферу, около 3.3 миллиардов тонн накапливается в виде углекислого газа, который будет оставаться в ней в течении многих сотен лет.

За последние 200 лет концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась на 30%.

Океаны и наземные растения могут поглотить лишь 40% выбросов углекислого газа производимого при сжигании нефти, угля и природного газа. а 60% выбросов накапливаются в атмосфере.

В настоящее время парниковый эффект от избыточного углекислого газа дает эффективный нагрев поверхности на уровне 2.45 Вт/м².

К 2050 г. эффект парниковых газов достигнет уровня 5-6 Ватт на квадратный метр и станет сравним с теми естественными изменениями уровня солнечного излучения, которые приводили в геологическом прошлом к существенным климатическим изменениям.

Палеоклиматические данные указывают на то, что климат может измениться быстро, за время сравнимое с жизнью одного поколения.



**Зависимость концентрации углекислого газа
в атмосфере Земли от времени.
 $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ объёма**



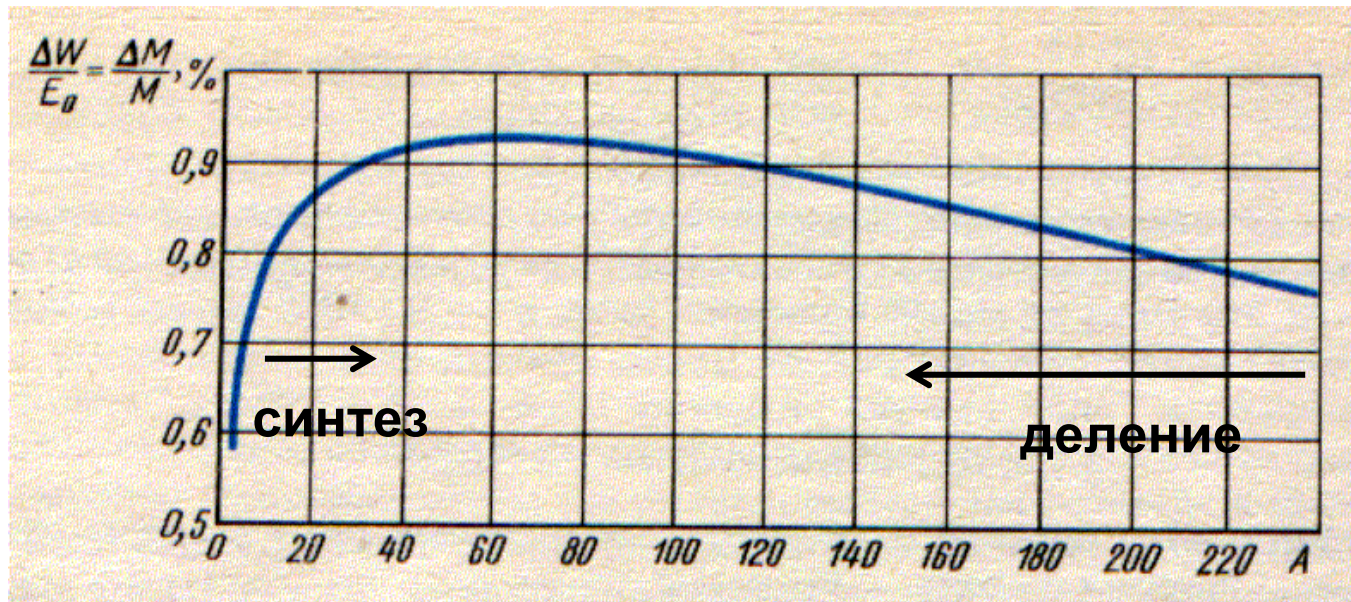
Предварительные выводы по энергетическим ресурсам

- Топливо с наименьшим ресурсом - *нефть*, её исчерпание может привести к перестройке промышленной инфраструктуры в мире, обострению борьбы за источники сырья и политической нестабильности;
- Ресурсы атомной энергетики на тепловых нейтронах (где сжигается только 1.5 % природного урана) также ограничены. Выход - переход к использованию *реакторов на быстрых нейтронах* (реакторов-размножителей), что требует доработки ряда важных технологий;
- Относительно велики запасы *угля*, однако его использование сдерживается влиянием на окружающую среду;
- Возможности использования *солнечной энергии* ограничиваются очень низкой плотностью энергии, а также колебаниями её во времени, что приводит к огромной площади коллекторов солнечного излучения и большой материалоемкости производства энергии.

Термоядерная энергетика

Энергия ядерных реакций

Энергия выделяется как при делении тяжёлых ядер, так и при синтезе лёгких ядер



Зависимость энергии связи ядра от числа нуклонов

Ресурсы и особенности термоядерной энергетики

Ядерные реакции, представляющие интерес для управляемого термоядерного синтеза

	Реакция	Энергетический выход, (МэВ)
1	$D + T = He^4 + n$	17.6
2	$D + D = He^3 + n$	3.27
3	$D + D = T + p$	4.03
4	$D + He^3 = He^4 + p$	18.4
5	$p + B^{11} = 3He^4$	8.7
6	$Li^6 + n = He^4 + T$	4.8
7	$Li^7 + n = He^4 + T + n$	- 2.47

1 эВ =

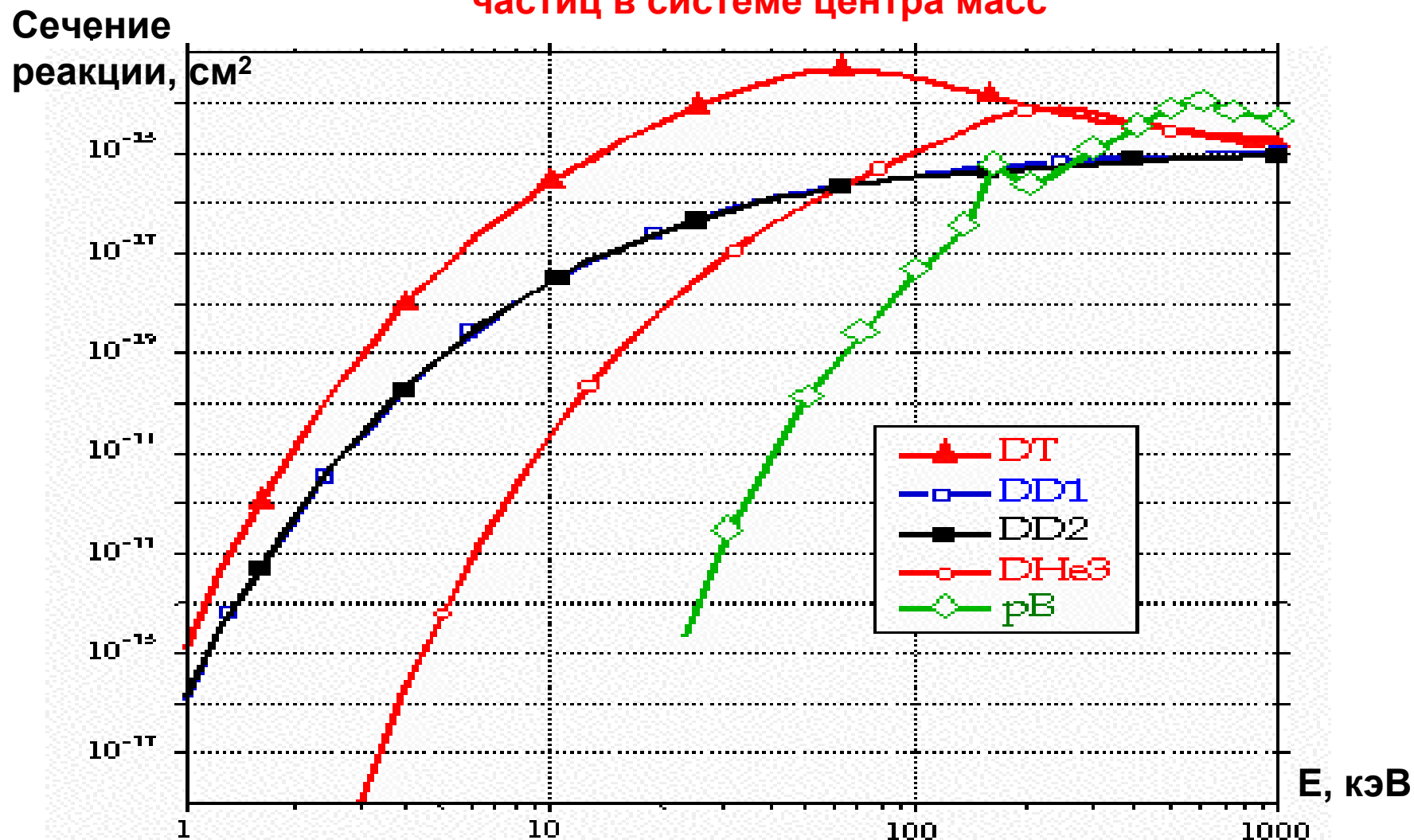
$1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж =

$11600^\circ K \approx 10^4 K$

1 кэВ $\approx 10^7 K$

1 МэВ $\approx 10^{10} K$

Сечения реакций, как функция энергии E сталкивающихся частиц в системе центра масс



Энергия, требуемая для интенсивного протекания реакций синтеза составляет 10 - 100 кэВ (10^7 - 10^8 K). Вещество, нагретое до такой температуры находится в состоянии плазмы, т.е. ионизованного газа.

Реакции синтеза во Вселенной

Ядерные реакции синтеза широко распространены в природе, будучи источником энергии звезд. Солнце является естественным термоядерным реактором.

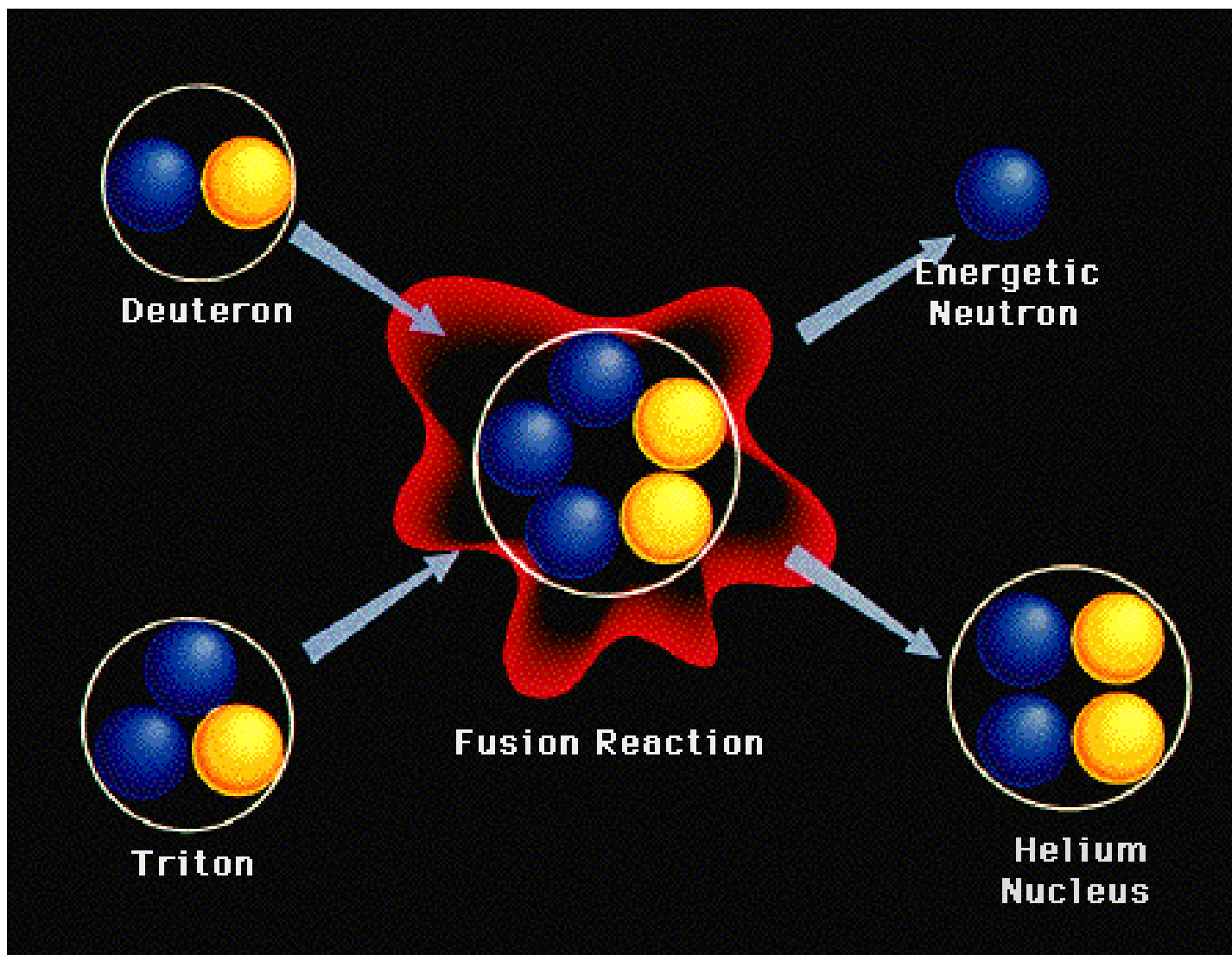
Вещество Вселенной более чем на 90% состоит из плазмы.



Запасы топлива для термоядерной энергетики практически неограничены.

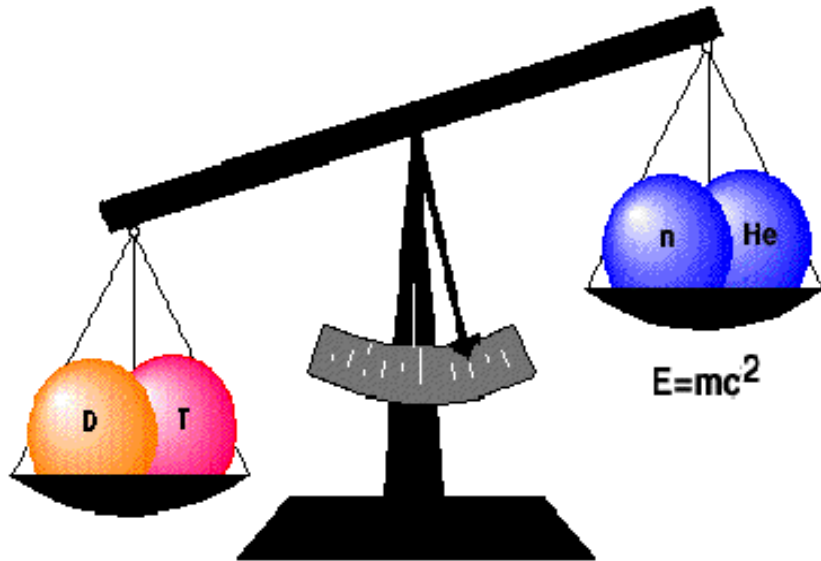
Дейтерий - широко распространенный в природе изотоп, он может добываться из морской воды. Полное количество дейтерия в океане составляет около $4 \cdot 10^{13}$ тонн. Его хватит для производства 10^{20} киловатт-лет электроэнергии.

Тритий будет производится в самом реакторе из лития. Запасы дейтерия и лития достаточны для производства энергии в течении многих тысяч лет



Управляемый термоядерный синтез использует ядерную энергию, выделяющуюся при слиянии легких ядер, таких как ядра водорода или его изотопов дейтерия и трития.

Стакан воды вместо бочки бензина



D-T реакция

T ~ 100 млн. градусов
инерциальное удержание

$n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ $\tau \sim 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ←

магнитное удержание

$n \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ $\tau \sim 1 \text{ с}$ ←

Необходимым условием осуществления термоядерной реакции с положительным выходом энергии является выполнение критерия Лоусона (по имени английского физика Дж. Лоусона, который сформулировал этот критерий в 1957 году).

Современный вид критерия Лоусона

$$nT\tau > 2 \cdot 10^{21} \text{ в кэВ} \cdot \text{с} / \text{м}^3$$

n - концентрация плазмы, T - температура, τ - время удержания плазмы.

Температура плазмы для D-T реакции должна быть масштаба 10 кэВ (т.е. выше ста миллионов градусов).

Что касается значений n и τ , то развиваются два основных направления в термоядерных исследованиях – инерциальный синтез и синтез, основанный на магнитном удержании плазмы.

Немного истории.

**Введение в инерциальный и
магнитный термоядерный синтез.**

**Современное состояние
исследований.**

Введение

Управляемый термоядерный синтез использует ядерную энергию, выделяющуюся при слиянии легких ядер, таких как ядра водорода или его изотопов дейтерия и трития.

Ядерные реакции синтеза широко распространены в природе, будучи источником энергии звезд. Ближайшая к нам звезда, Солнце, - это естественный термоядерный реактор, который уже многие миллиарды лет снабжает энергией жизнь на Земле.

Ядерный синтез уже освоен человеком в земных условиях, но, к сожалению, пока не для производства мирной энергии, а для военных целей.

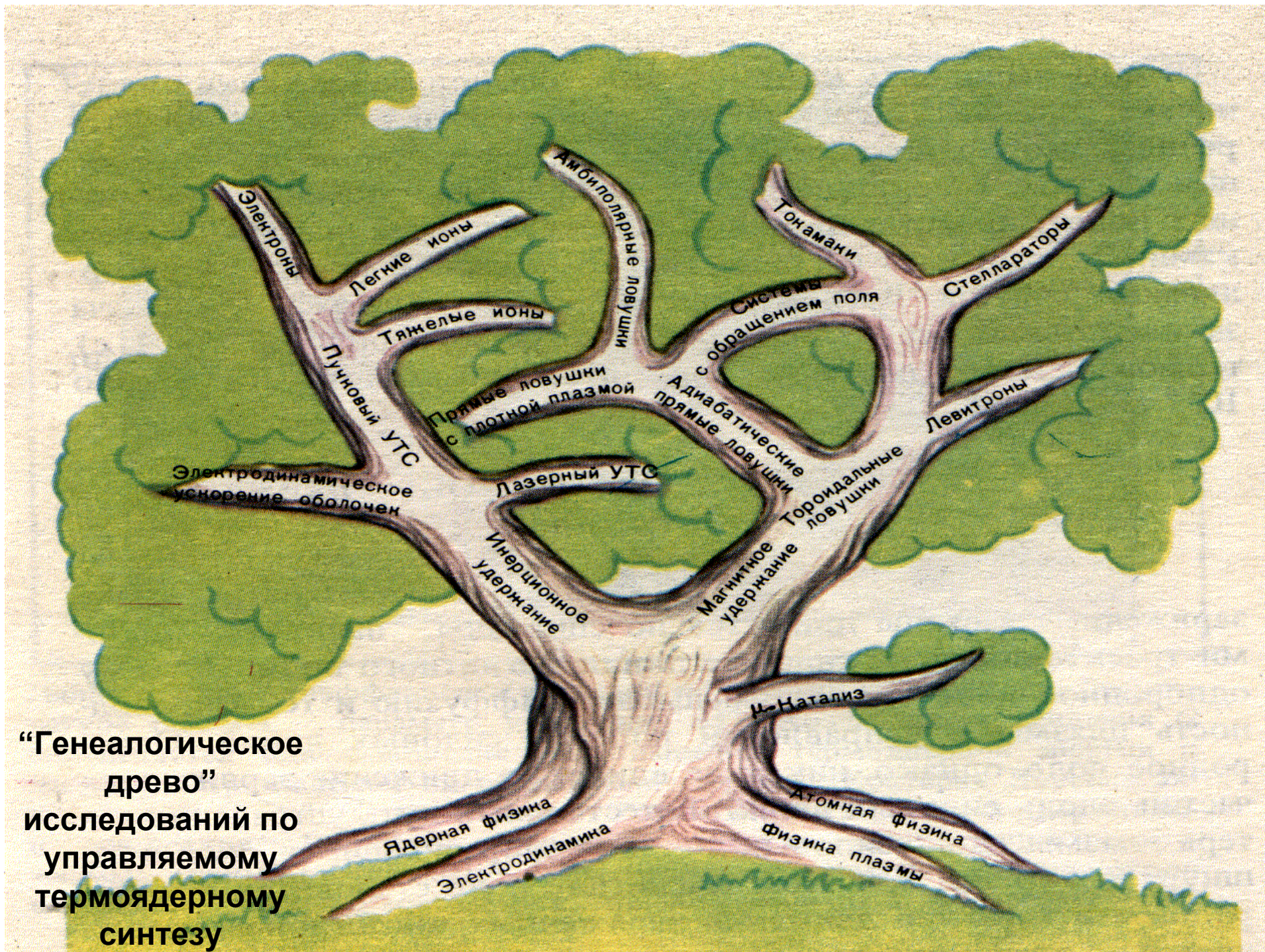
На атолле Эниветок в Тихом океане 1 ноября 1952 года ученые США с помощью атомной бомбы подорвали огромный объем (около 50 тонн) жидкого дейтерия и трития, получив при этом взрыв ранее невиданной мощности, эквивалентный взрыву 500 бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки.

Введение (продолжение)

Начиная с 50-х годов, в нашей стране (5 мая 1951 года было выпущено Постановление Совета Министров СССР о развертывании работ по термоядерной программе, и руководителем программы был назначен И.В. Курчатов) и параллельно во многих других странах проводятся исследования по созданию управляемого термоядерного реактора.

С самого начала стало ясно, что управляемый термоядерный синтез не имеет военного применения. В 1956 году исследования были рассекречены (Выступление И.В.Курчатова на международной конференции (Харуэл, Англия), в котором от имени Советского Правительства была открыта информация о проведении в СССР работ по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и физике плазмы) и с тех пор проводятся в рамках широкого международного сотрудничества.

Исследования по программе УТС развивались по двум основным направлениям – инерциальному и магнитному. И сегодня можно констатировать, что более чем 50-летняя история исследований завершается созданием на международной основе Экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, в основе которого лежит концепция Токамак, предложенная и развитая советскими учеными.



Основоположники термоядерных исследований в России



Академик
Курчатов И.В.
(1902-1960 гг.)



Академик
Тамм И.Е.
(1895-1971 гг.)



Академик
Леонтович М.А.
(1903 - 1983гг.)



Академик
Сахаров А.Д.
(1921-1989гг.)

Основоположники термоядерных исследований в России



**Академик
Арцимович Л.А.
(1909-1973 гг.)**



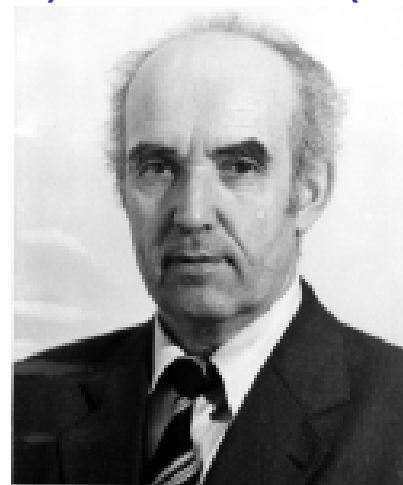
**Профессор
Головин И.Н.
(1913-1997 гг.)**



**Доктор физ.-мат.
наук Явлинский Н.А.
(1912-1962 гг.)**



**Академик
Кадомцев Б.Б.
(1928-1998 гг.)**



**Академик
Шафранов В.Д.
(1929 г.)**

Инерциальный термоядерный синтез

Принцип действия термоядерного синтеза на основе инерциальных систем

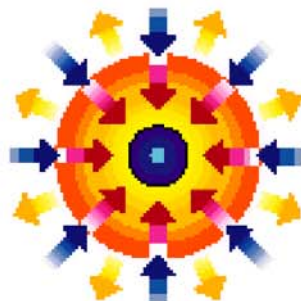
➡ Driver beam



Target heating

Импульс излучения (свет, гамма-излучение, ионы) быстро нагревает поверхность капсулы с топливом

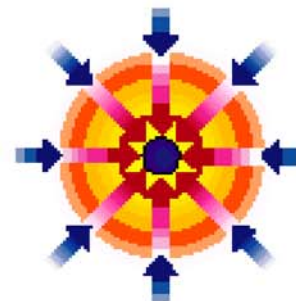
➡ Blowoff



Compression

Топливо быстро сжимается

➡ Inwardly transported thermal energy



Ignition

Когда плотность топлива достигает приблизительно 20 плотностей свинца, происходит зажигание реакции при 100 000 000 °C



Burn

Термоядерное горение быстро распространяется по всему объему топлива и выделяющаяся энергия превосходит подводимую во много раз

Полная термоядерная энергия, выделяющаяся за импульс, эквивалентна энергии сжигания около 12 килограммов угля

Инерциальный термоядерный синтез

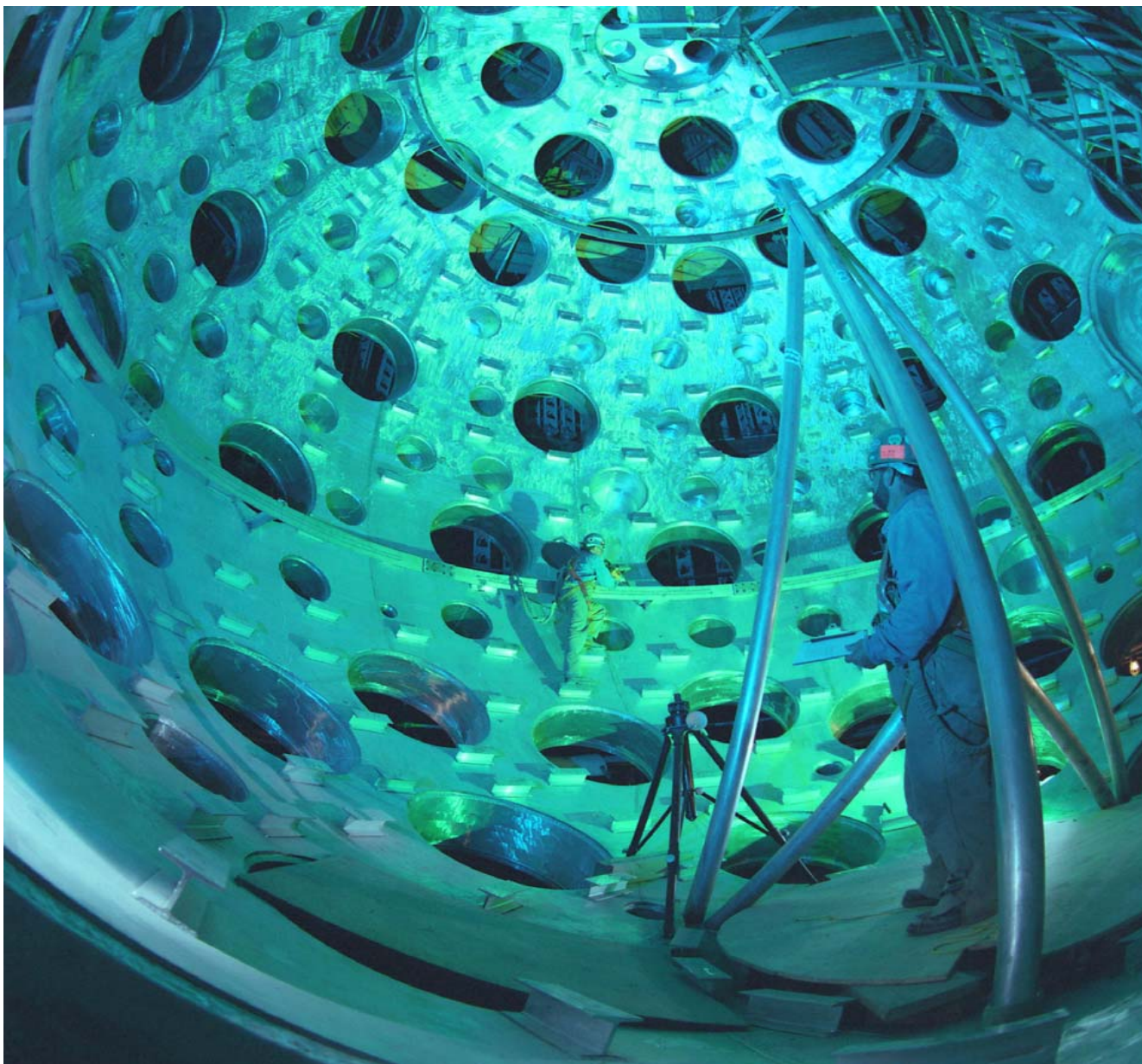
Реализация проекта термоядерной электростанции с использованием пучков ионов или лазерного излучения требует решения четырех основных проблем:

Создание и исследование мишеней с высоким коэффициентом усиления мощности ($P_{\text{т.я.}}/P_{\text{нагр}} = 50-100$).

Разработка и демонстрация эффективного ($\gg 10-30\%$) и с высокой частотой повторения импульсов ($\gg 5-10$ герц) драйвера.

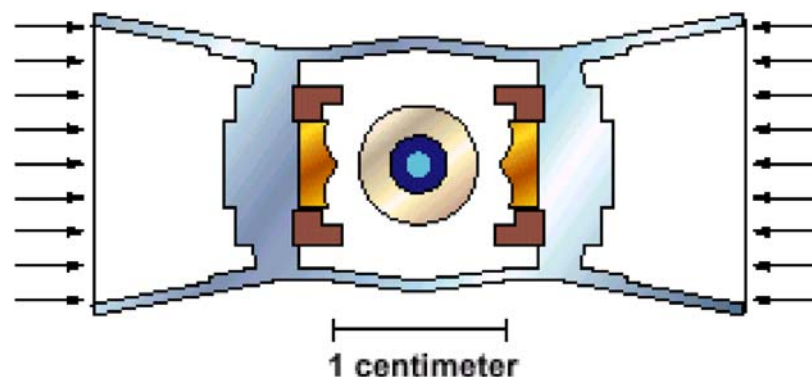
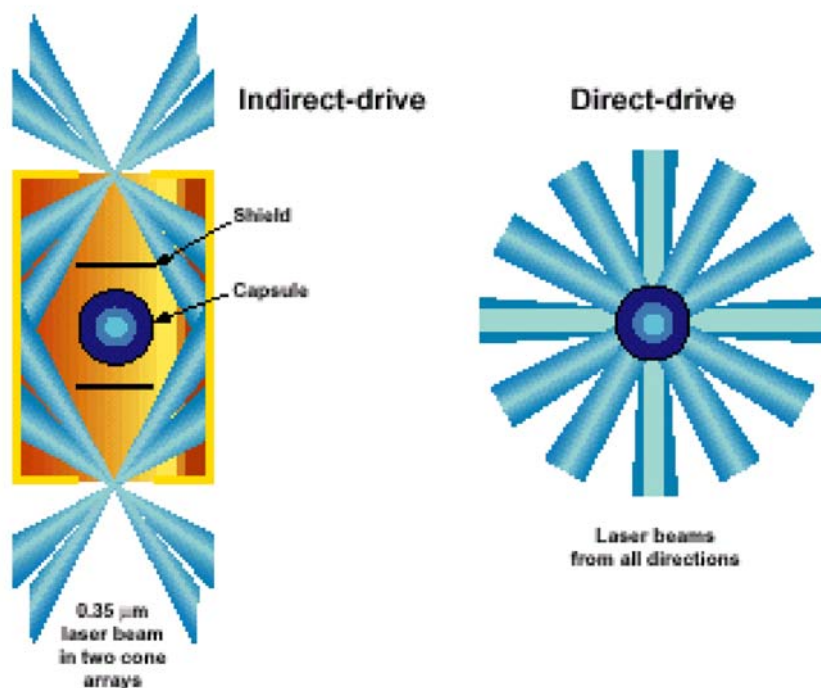
Достижение низкой стоимости производства мишеней ($\gg 25$ центов каждая) в сочетании с высокой производительностью при их изготовлении ($\gg 100$ миллионов в год).

Разработка надежной камеры взаимодействия, изготовленной из малоактивируемых материалов и рассчитанной на срок эксплуатации до 30 лет.



Вакуумная
камера для
инерциального
термоядерного
синтеза

Мишени для установок инерциального термоядерного синтеза



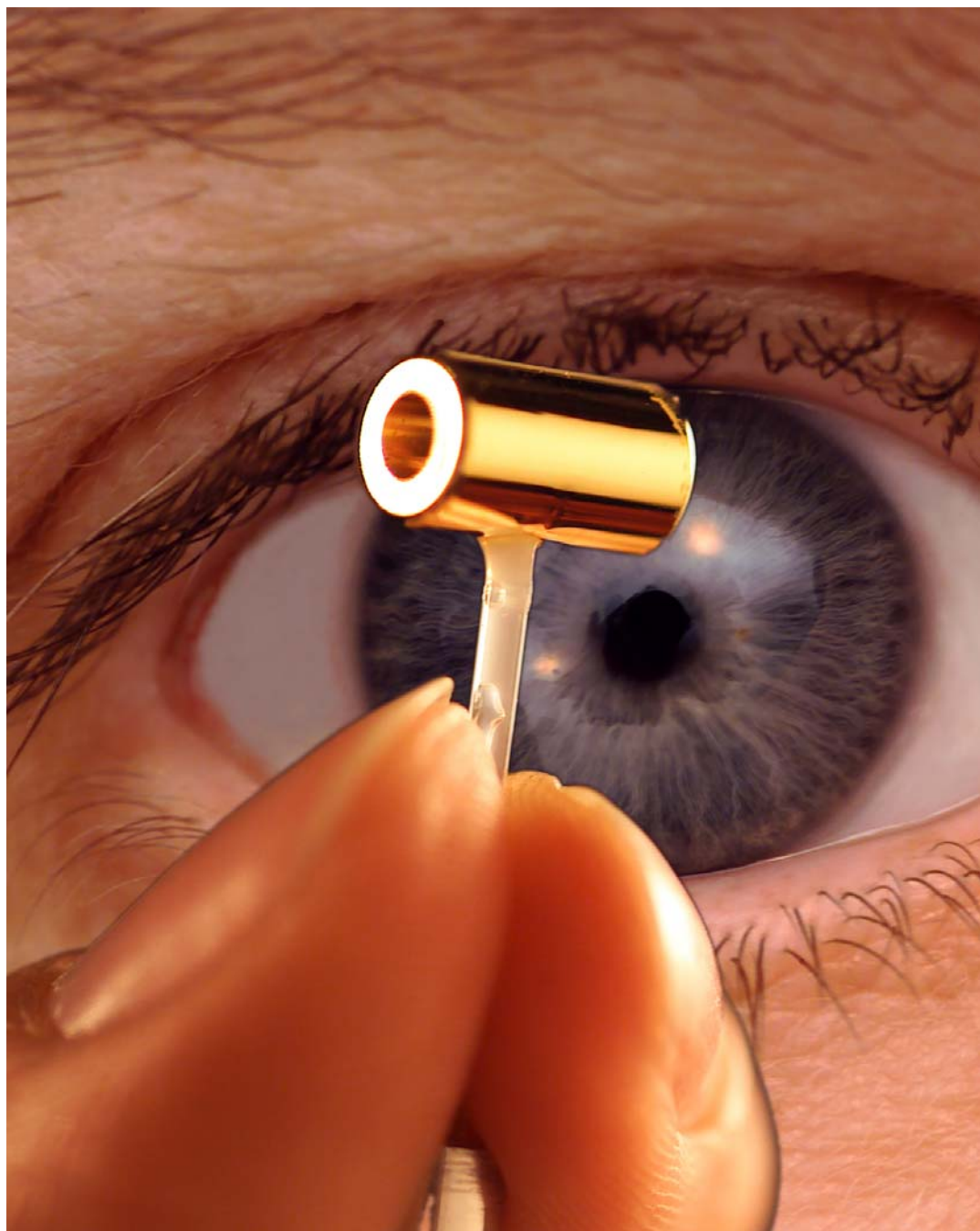
Мишени для твердотельных лазеров

В мишенях с непрямым нагревом (слева на рисунке) внешний металлический цилиндр из золота или свинца содержит пластиковую капсулу (около 3 мм в диаметре), которая содержит небольшое количество DT газа. Лазерное излучение вводится в цилиндр через две конические сборки.

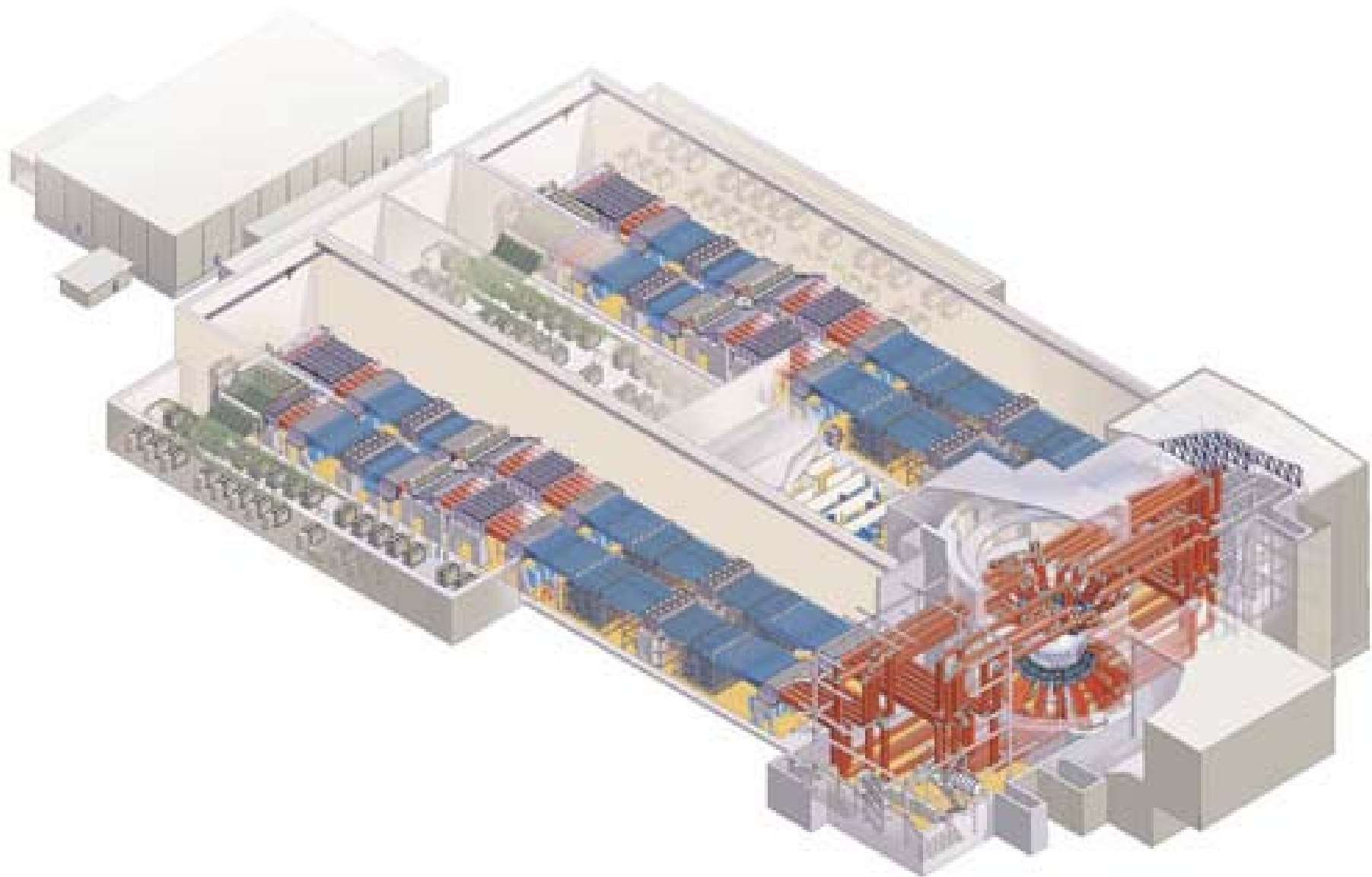
Мишени с прямым нагревом (справа) однородно облучаются со всех направлений

Мишени для драйвера на тяжелых ионах

В мишенях для тяжелых ионов пластиковая капсула с топливом полностью окружена материалами, во-первых, для конверсии энергии ионов в гамма-излучение и, во-вторых, удержания гамма-излучения в объеме, окружающем капсулу.



**Мишень для
инерциального
термоядерного
синтеза**



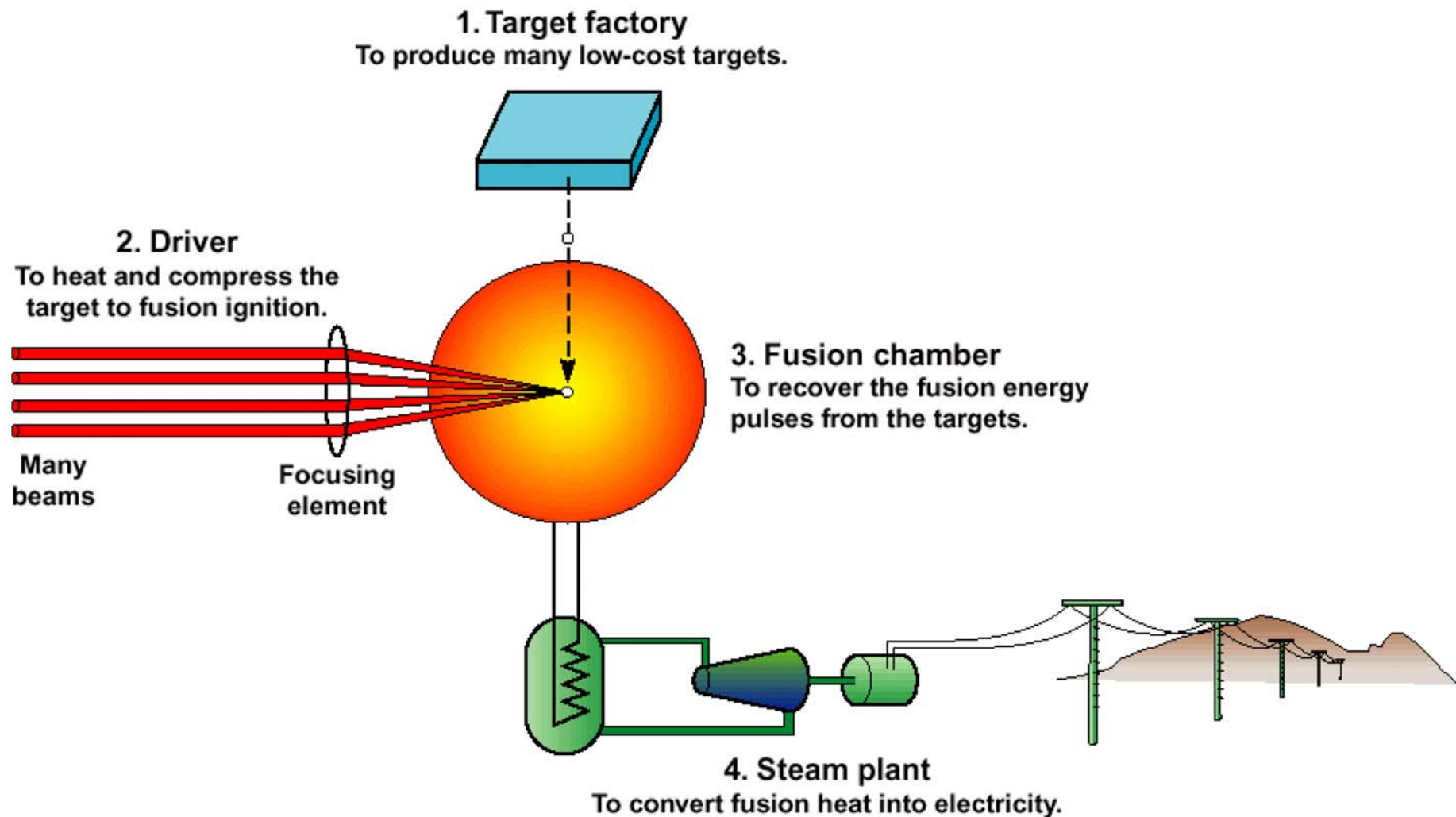
**Национальный эксперимент по зажиганию (NIF, США)
(192 лазерных линий, 1.8 МДж на мишени)**



Строительство NIF (National Ignition Facility) - сегодня

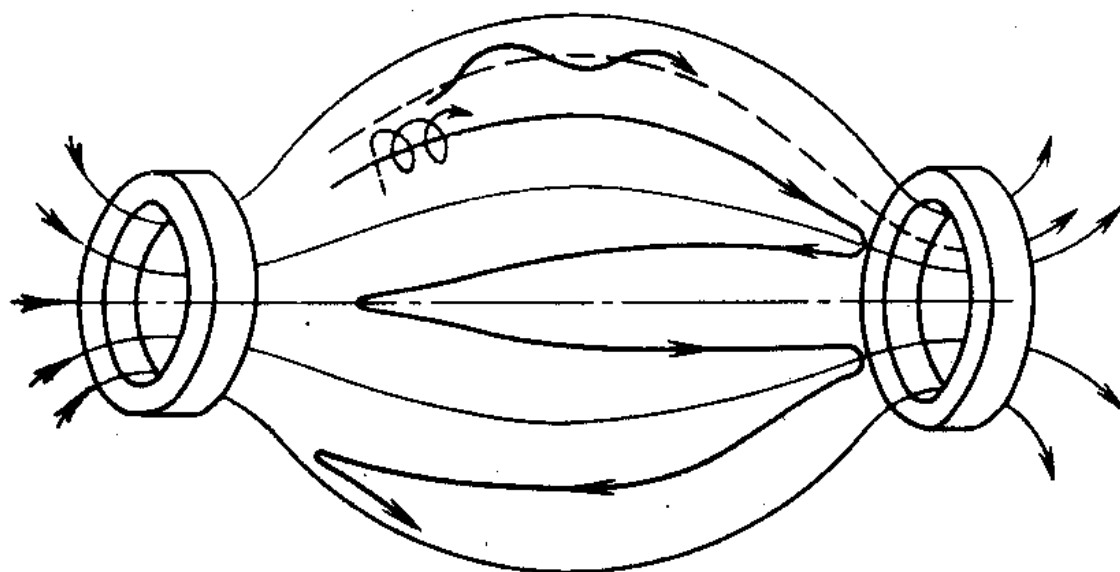


Схема термоядерной электростанции с использованием пучкового или лазерного драйвера



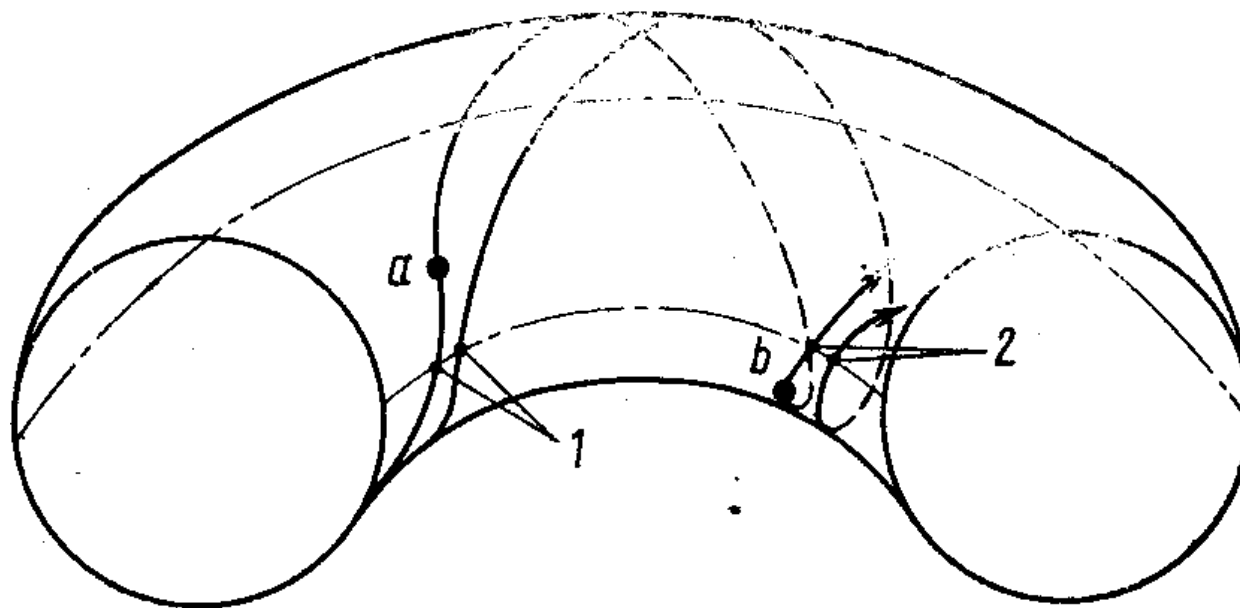
Магнитное удержание плазмы

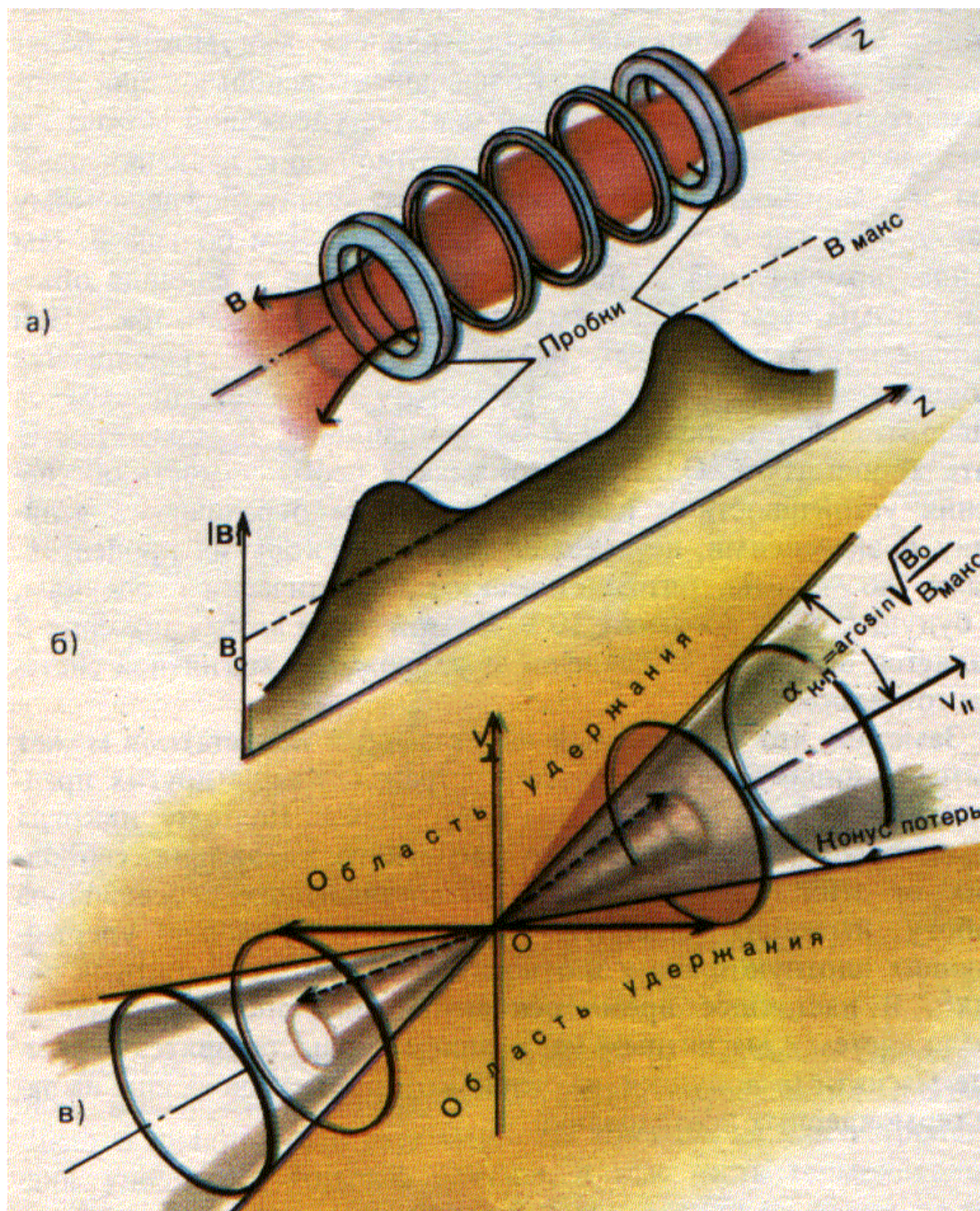
Принципы магнитного удержания плазмы



Простейшая
открытая
магнитная
ловушка

Замкнутая магнитная
ловушка с
вращательным
преобразованием





а - простейшая ловушка с магнитными пробками,

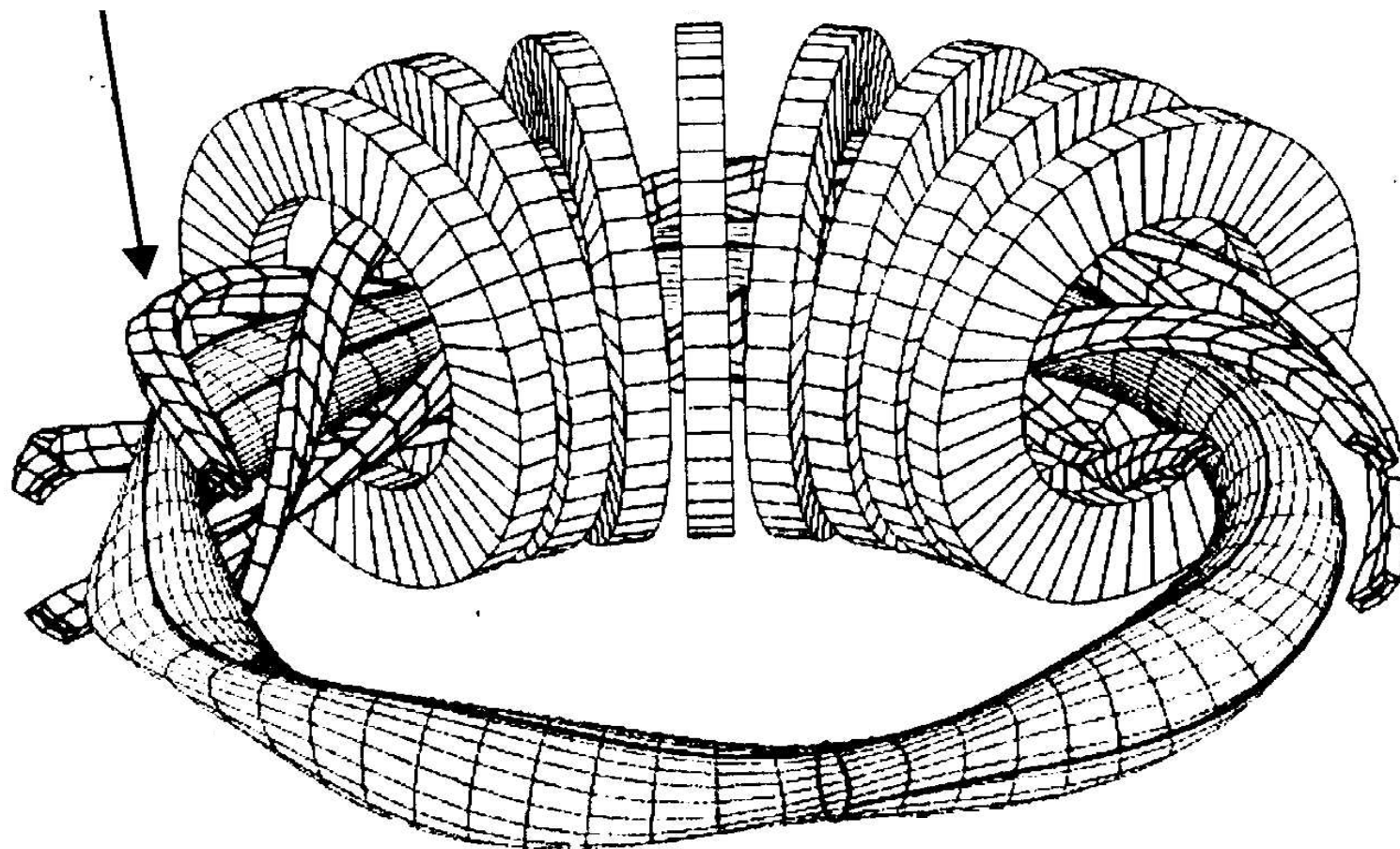
б - аксиальное распределение магнитного поля в ловушке,

в - "конус потерь" заряженных частиц в ловушке

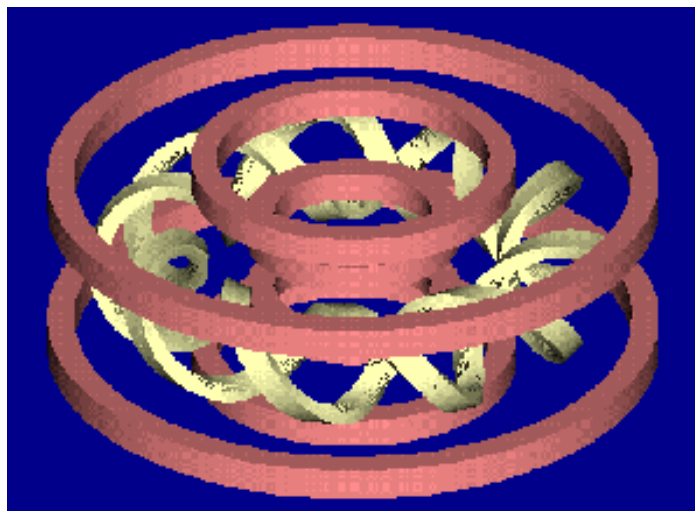
Классический стелларатор с непрерывной винтовой обмоткой

Винтовая
обмотка

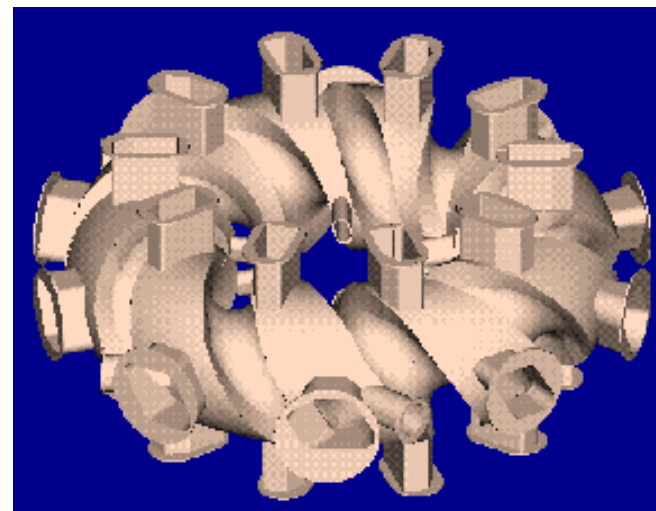
Обмотка тороидального поля



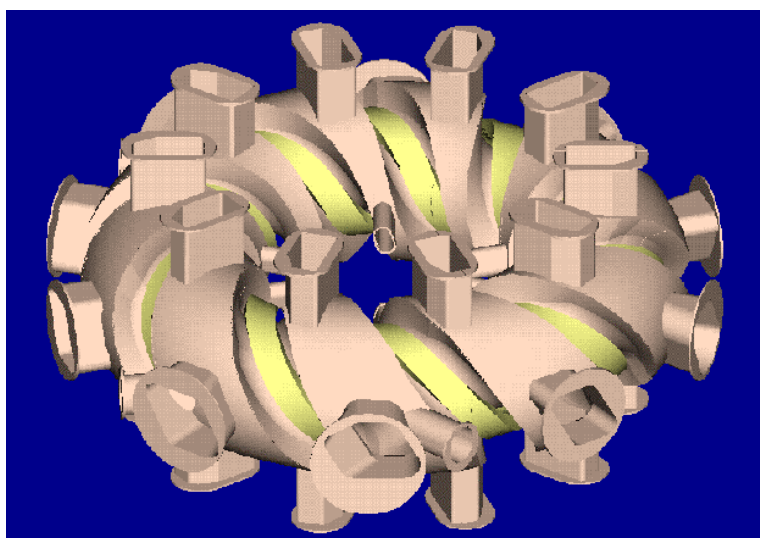
Япония: LHD (Large Helical Device) $R = 3.9$ m, $a_p = 0.6$ m, $A = 6.5$, $B = 4$ T



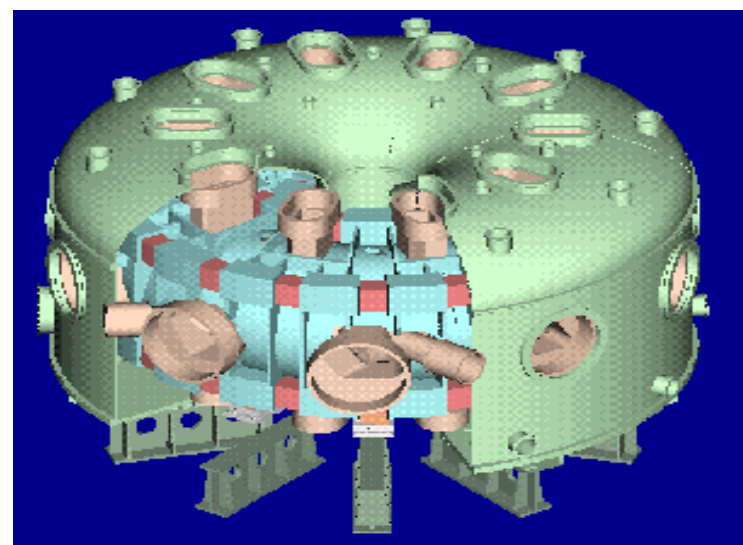
Винтовая и компенсирующая обмотки



Вакуумная камера

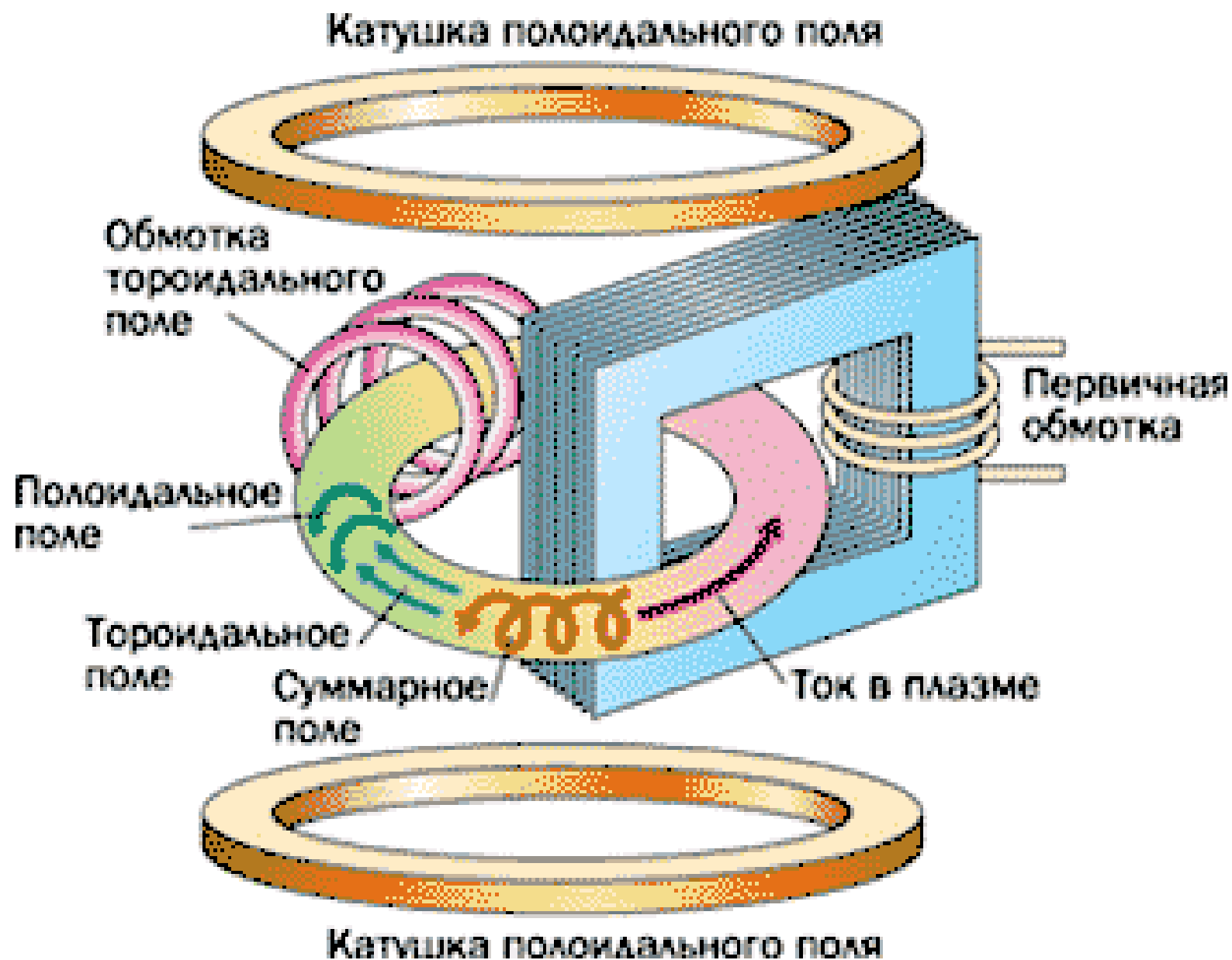


Камера с винтовой обмоткой



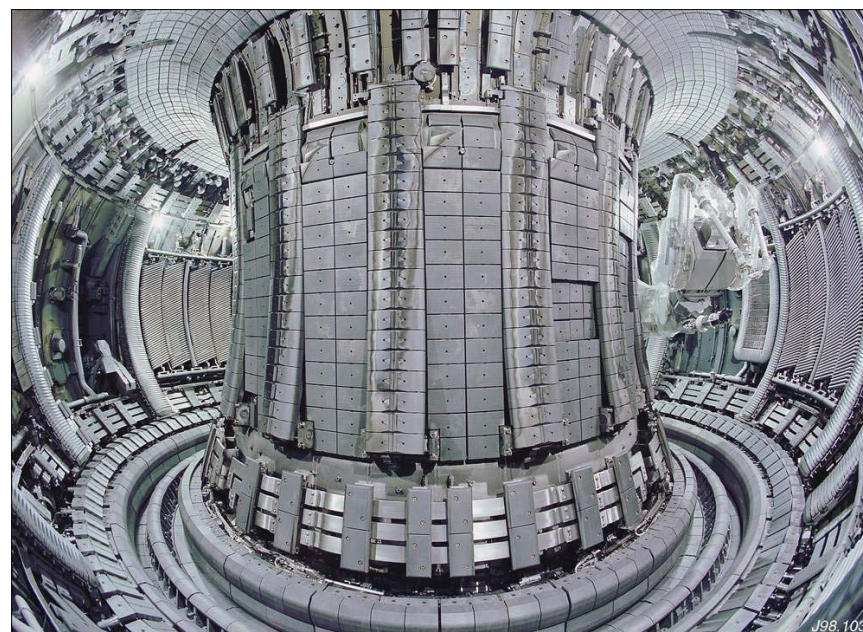
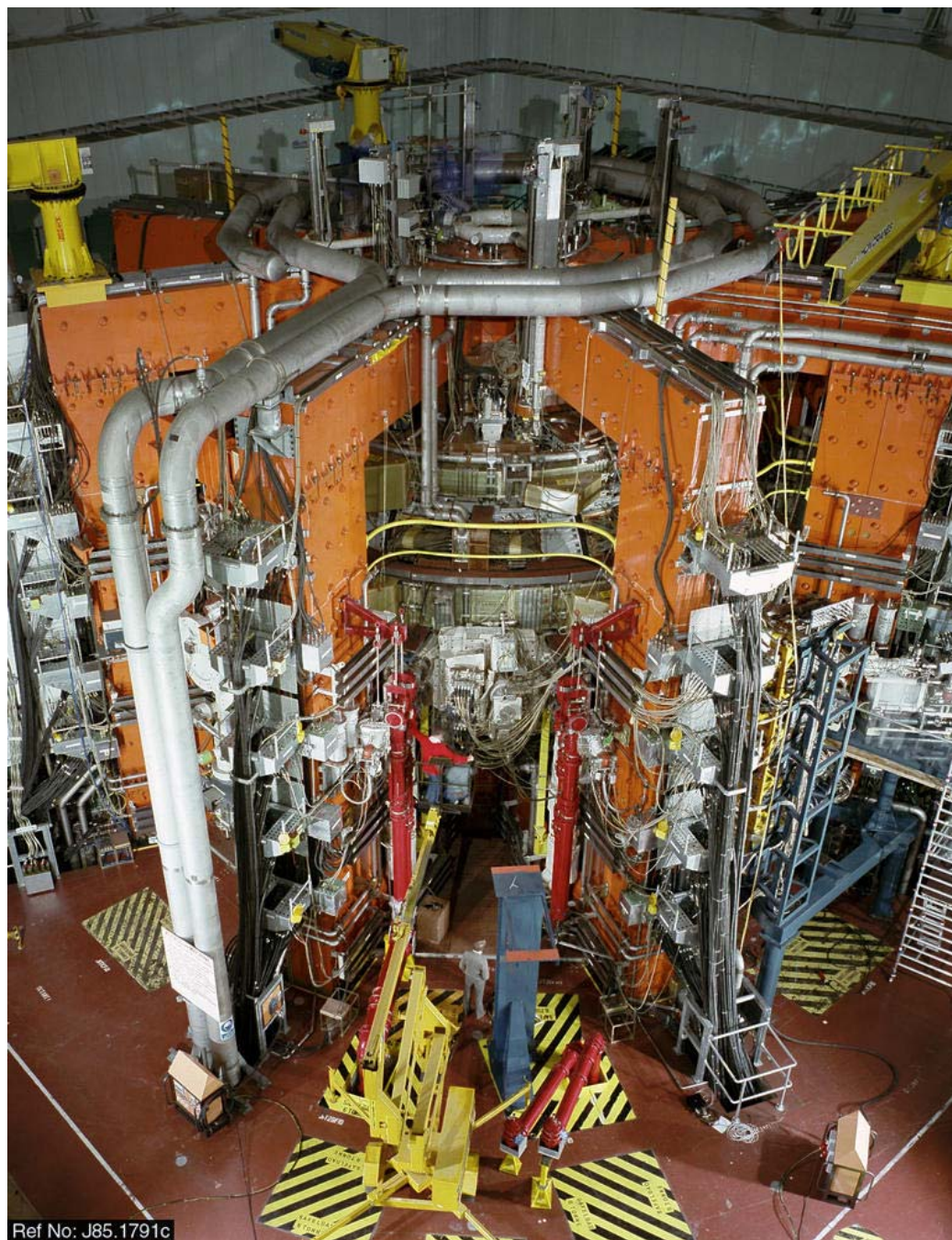
Установка в сборке

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТОКАМАКА

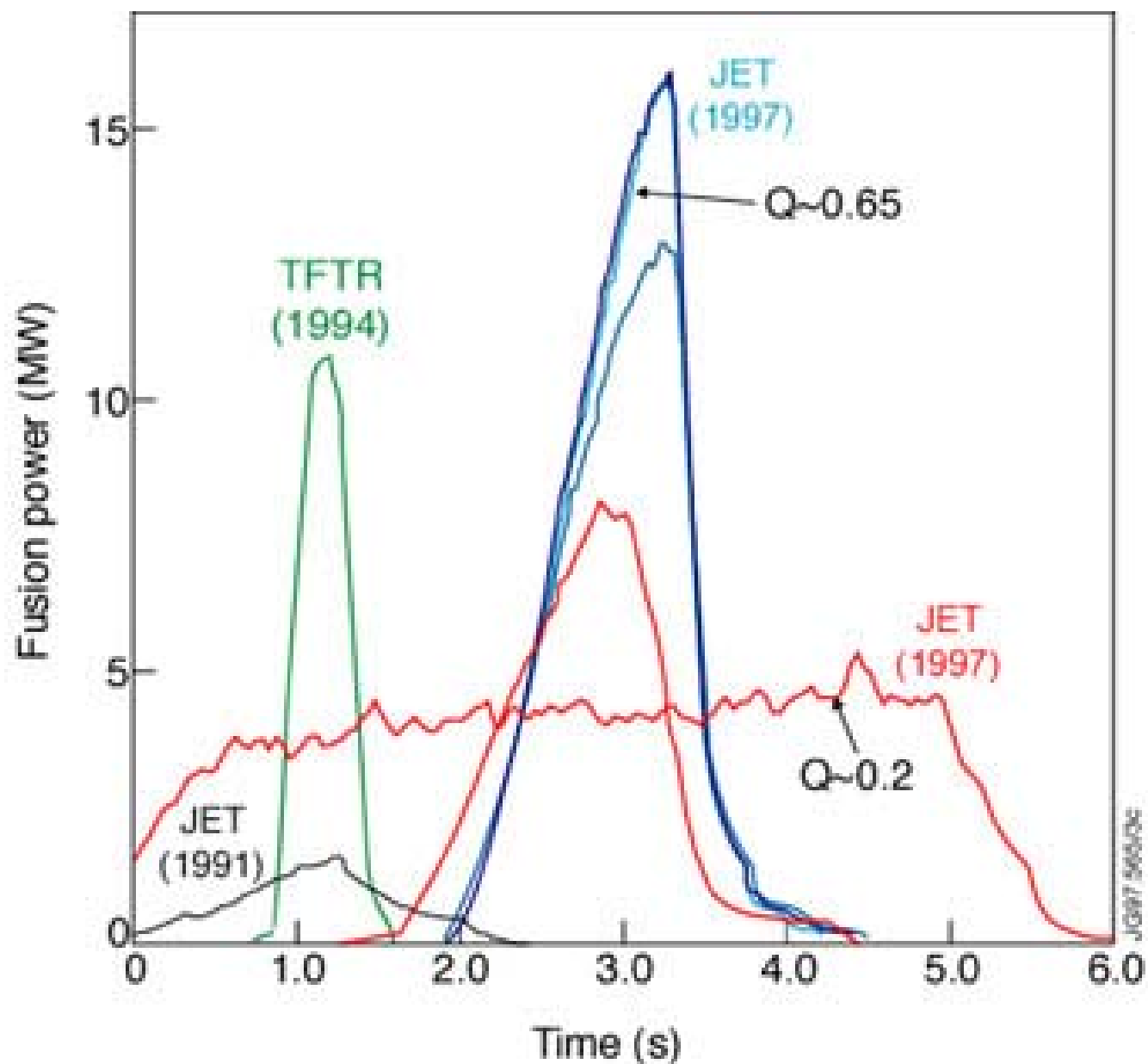


Крупнейшие установки мира для УТС

Вид токамака
JET (Англия)

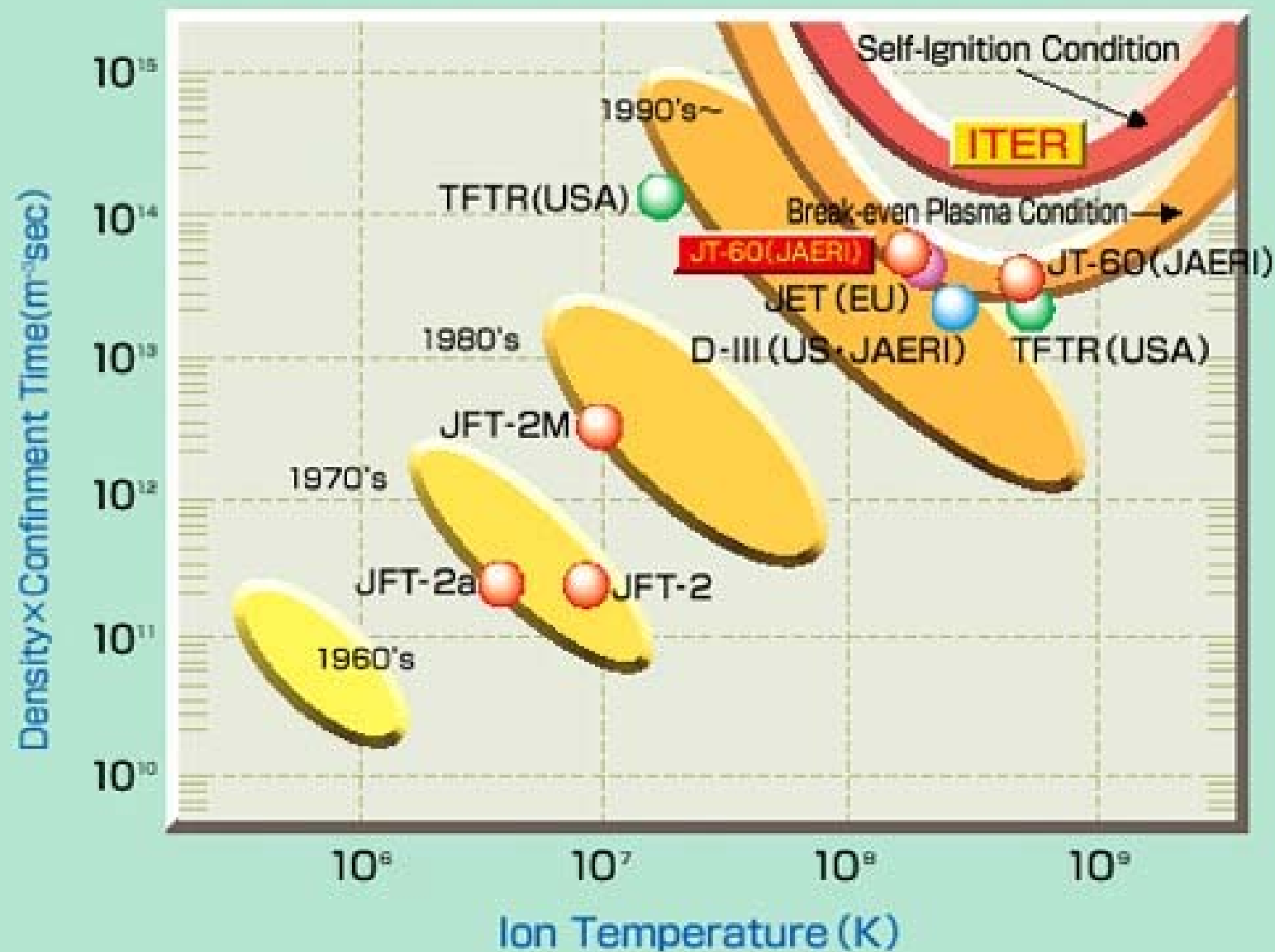


Экспериментальные результаты на крупнейших токамаках в мире

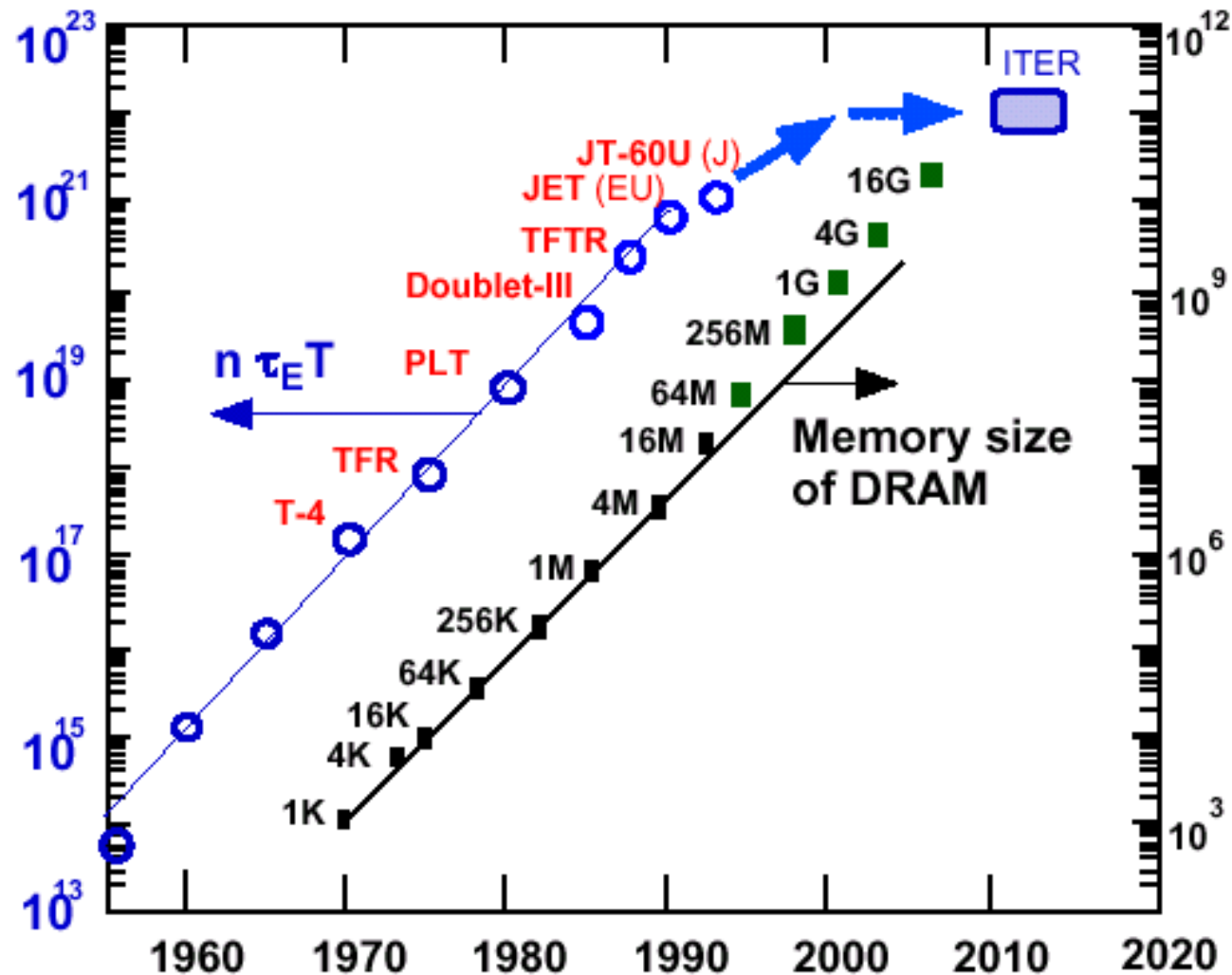


Эксперименты по
зажиганию DT-
реакции на
токамаках JET
(Англия) и TFTR
(США)

World Progress of Tokamak Plasmas



Скорость увеличения параметра $nT\tau_E$ в токамаках
по сравнению со скоростью роста оперативной
памяти персональных компьютеров



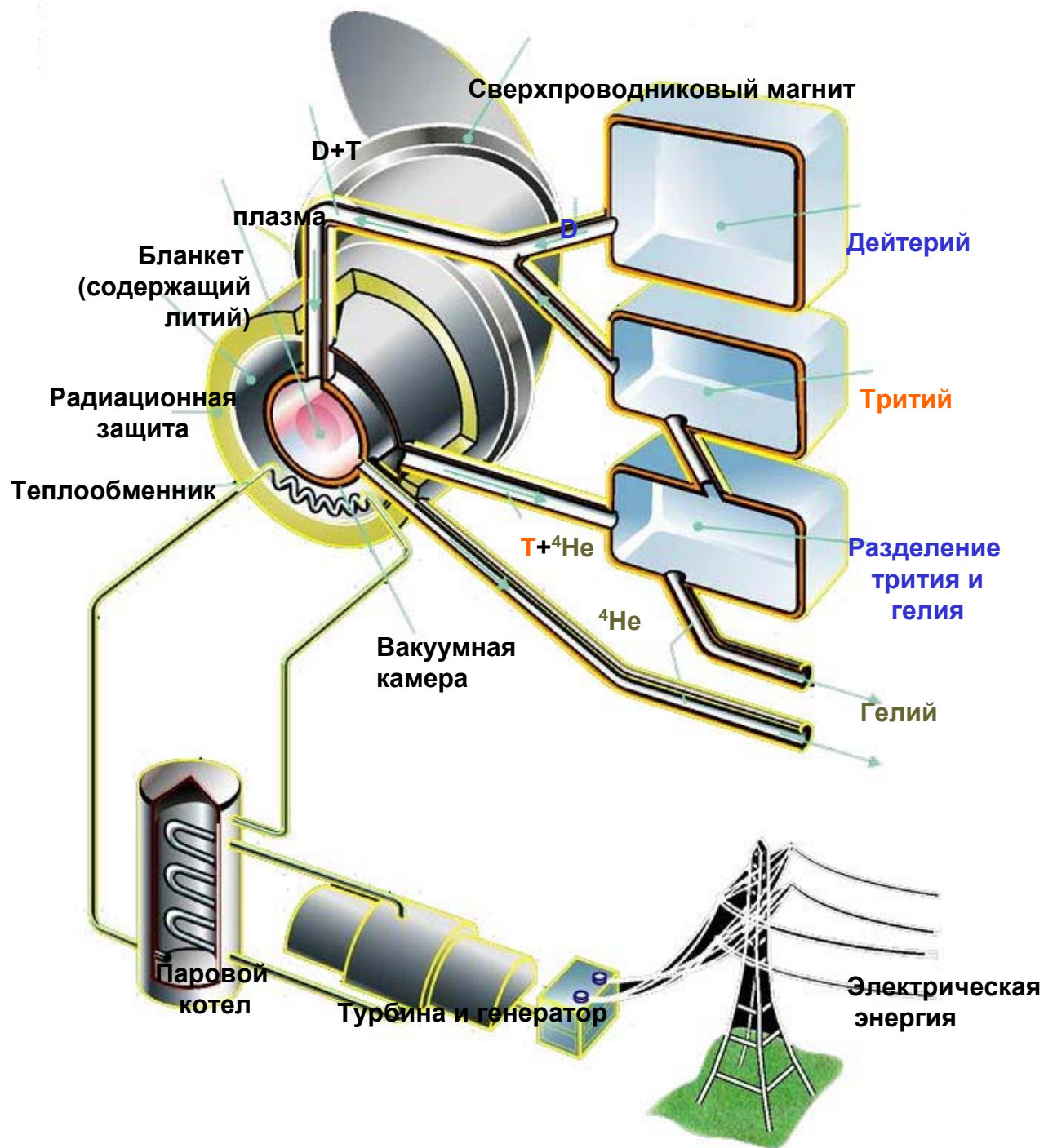


Схема
энергетического
термоядерного
реактора