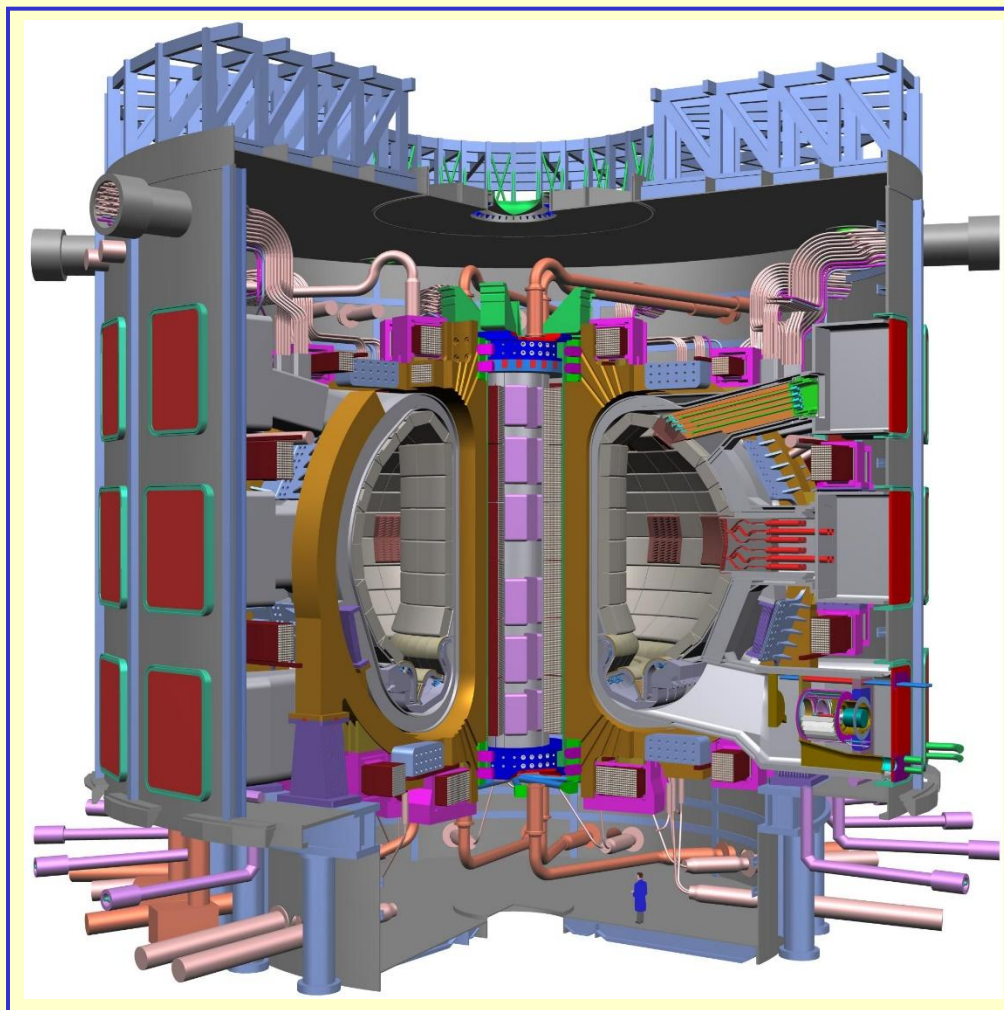


Раздел 7

Ядерный синтез – энергетика будущего



План

1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Энергия связи

Масса атома гелия ${}^4_2\text{He}$ 4.0026 а.е. м., а сумма масс $2 {}^1_1\text{p}$, $2 {}^1_0\text{n}$ и 2e – 4.033 а.е.м. Какая энергия выделяется при слиянии ${}^1_1\text{p}$ и ${}^1_0\text{n}$ в ядро ${}^4_2\text{He}$ (энергия связи)?

$$\Delta E_{\text{He}} \approx \Delta m \cdot c^2 \approx 0.03 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \approx 4.6 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} \approx 28 \text{ МэВ.}$$

Для всех известных ядер энергии связи $E_{\text{св}}$ как функция от массового числа ядра A изображена на графике.

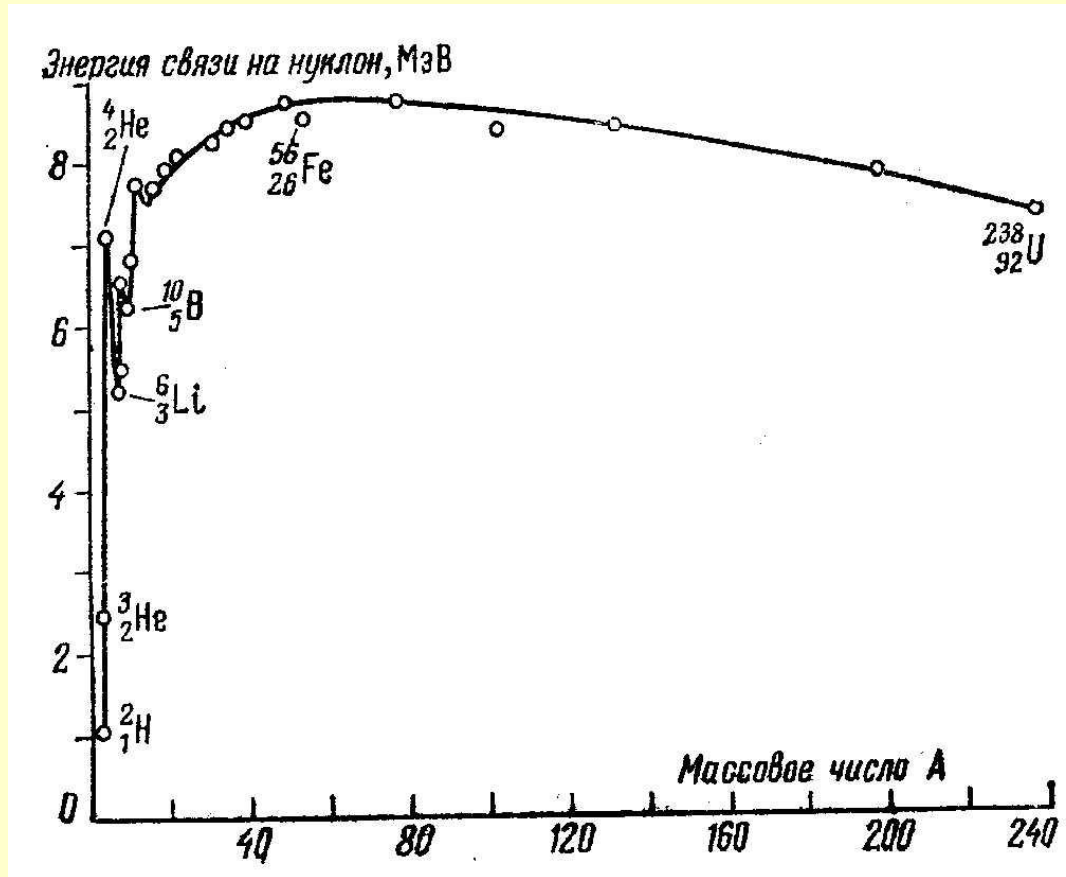


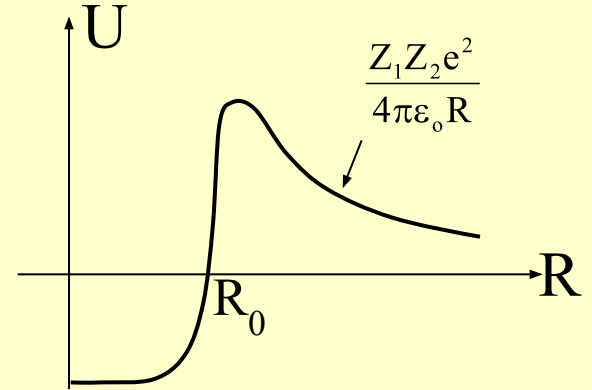
Рисунок показывает на два основных пути извлечения энергии ядер: а) синтез лёгких ядер (из водорода, дейтерия); б) деление тяжёлых ядер (уран).

Реакции, в которых из лёгких ядер образуются более тяжёлые, называются реакциями ядерного синтеза.

Кулоновский барьер

Вид потенциальной энергии взаимодействия ядер изображён на графике. На больших расстояниях кулоновские силы приводят к отталкиванию, на малых – ядерные силы обеспечивают притяжение.

Для осуществления синтеза надо преодолеть кулоновский барьер и сблизить ядра до $R_0 < 10^{-14}$ м. (Для сравнения: характерное значение радиуса ядра, $R_{\text{nucl}} \approx 1.5 \cdot 10^{-15}$ м.)



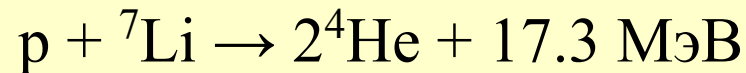
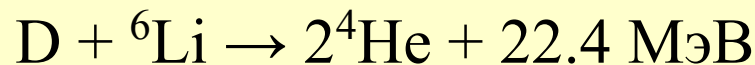
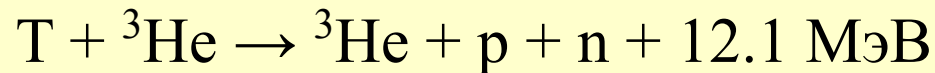
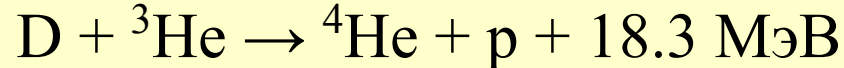
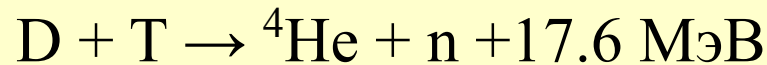
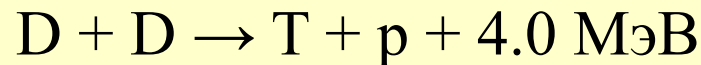
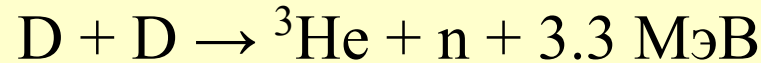
Зависимость энергии взаимодействия двух ядер от расстояния между ними

Выводы из зависимости для кулоновского барьера $U_0 \approx \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R}$:

- кулоновский барьер минимален для самых лёгких ядер ($Z_1 = Z_2 = 1$), т.е. для изотопов водорода (H, D, T);
- величина кулоновского барьера составляет сотни кэВ. Так при $Z_1 = Z_2 = 1$, $R = R_0 = 10^{-14}$ м энергия кулоновского отталкивания составляет $U_0 \approx 0.15$ МэВ. При реакциях водорода с гелием $U_0 \approx 0.3$ МэВ, с литием $U_0 \approx 0.45$ МэВ.

Основные реакции синтеза

Наиболее вероятны следующие реакции синтеза с участием лёгких ядер (H, D, T, ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li):



При преодолении кулоновского барьера (затраты менее 0.5 МэВ) можно в принципе получить выигрыш по энергии.

Решающее значение при выборе реакции имеет возможность достижения условий, при которых выбранная реакция идет со скоростью, представляющей практический интерес.

Процессы синтеза в звездах и на Земле

1. Что происходит на Солнце?

а) Водородный цикл – превращение протонов в гелий без катализатора. Время (вероятность) реакции – для условий внутренних областей Солнца.

Реакция	Энергия, МэВ	Время реакции
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$	0.4	14 млрд. лет
$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$	1	10^{-19} с
$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.5	5.7 с
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12.9	~ 1 млн. лет

б) Углеродно-азотный цикл (протоны – в гелий в результате цепи из 6 реакций с «катализом» ${}^{12}\text{C}$), энергетический выход такой же, время реакции в 50 раз меньше.

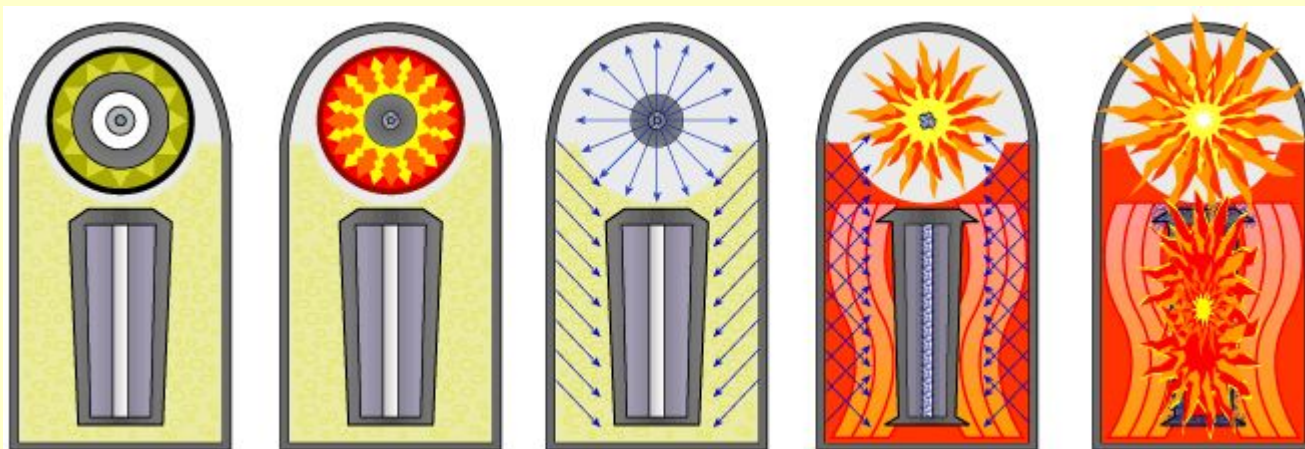
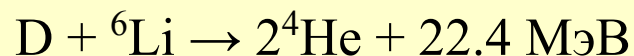
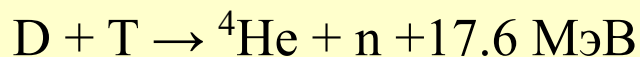
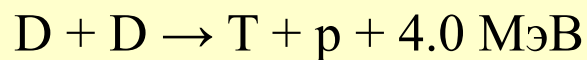
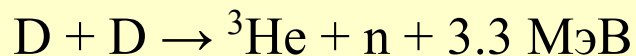
Время жизни Солнца – $5 \cdot 10^9$ лет; то есть прореагировала меньшая часть солнечного водорода.

В результате выделение ядерной энергии на Солнце – 20 Вт/м^3 (человек - 2000 Вт/м^3). Солнце греет планеты своей системы только благодаря грандиозным размерам.

На Земле такая скорость протекания реакции никого не устраивает.

2. Что происходит в водородной бомбе?

«Запал» водородной бомбы – обычная ядерная. Необходимая для зажигания температура сохраняется около 10^{-5} с, поэтому исходные вещества должны иметь максимальную плотность. Используются твердые LiD и LiT.



За указанное время выделяется $\sim 10^{17}$ Дж (т.е. 10^{22} Вт). Для сравнения, мощность крупнейших современных электростанций $\sim 10^{10}$ Вт.

Таким образом, скорость реакции в бомбе слишком велика!

1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Требования к реактору синтеза

Что нужно от устройства, вырабатывающего энергию от реакций синтеза на Земле?

Технически осмысленны и обоснованы такие параметры:

Объём $\sim 1000 \text{ м}^3$, мощность $\sim 1\text{-}3 \text{ ГВт}$ (тепловых), режим – близкий к стационарному. Мощность энерговыделения $\sim 1\text{-}3 \text{ МВт/м}^3$.

Отличие УТС от процессов на Солнце и в бомбе:

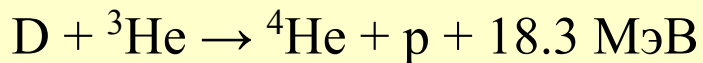
- мощность энерговыделения в 10^5 раз больше, размеры существенно меньше, чем на Солнце; необходима гораздо более высокая температура, чем на Солнце, необходим другой тип реакции, с бóльшей вероятностью (большим сечением), чем на Солнце;
- желателен стационарный режим работы в отличие от импульсного процесса взрыва.

Сечения реакций синтеза

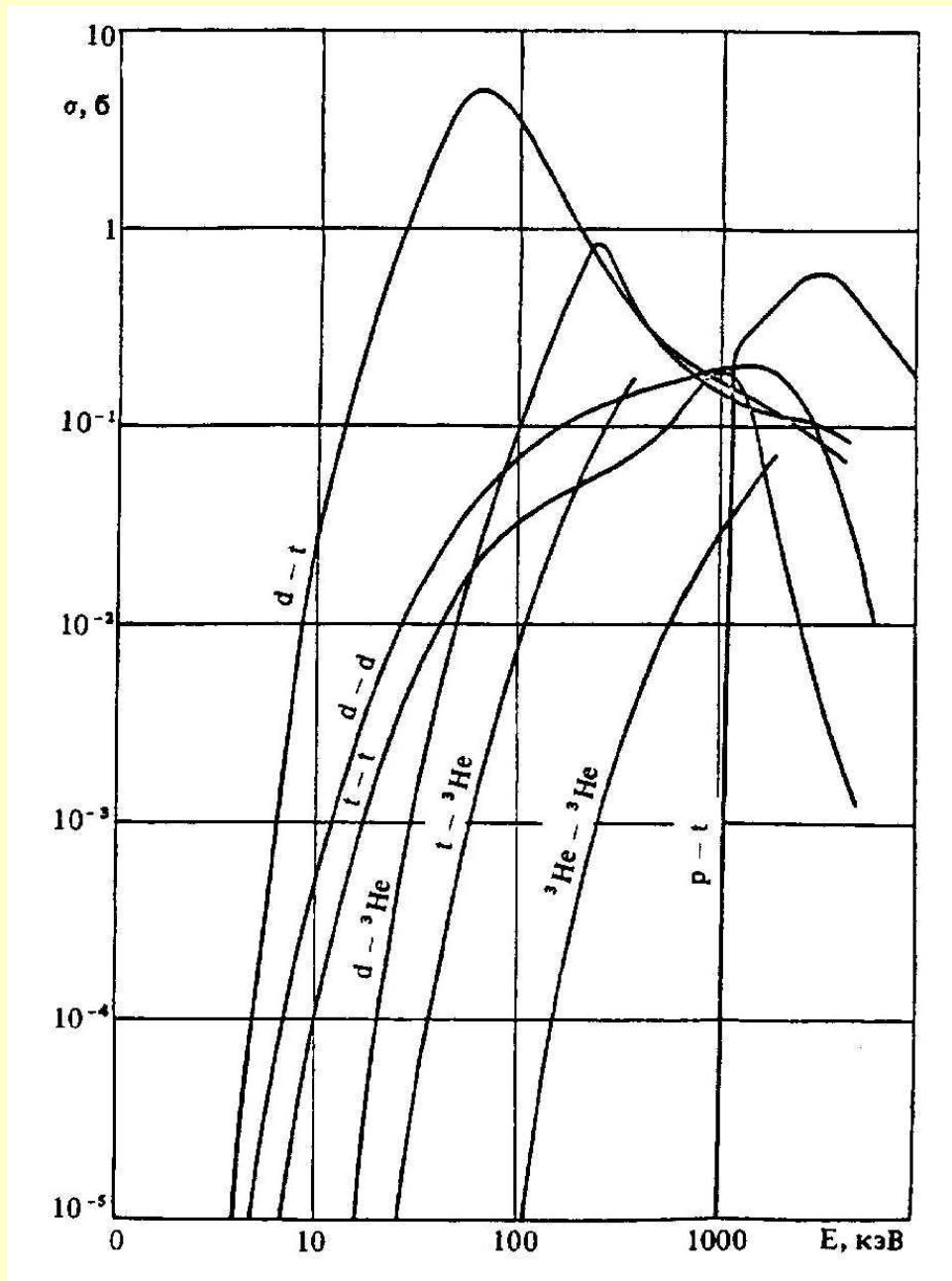
Сечения реакций синтеза являются функцией энергии и типа взаимодействующих частиц.

Как видно из графиков, наибольшее сечение – у реакции (d-t), $\sigma_{\max} \approx 5$ барн при $E \approx 100$ кэВ (единица сечения 1 барн соответствует 10^{-24} см²); сечения других реакций меньше 1 барн, а энергия, соответствующая σ_{\max} – больше.

Также примечательна реакция D с ³He:



в которой все образующиеся частицы являются заряженными и в термоядерном реакторе остаются в плазме. При использовании этой реакции образование радиоактивных продуктов минимально.



Анализ формул сечения реакций

Квантовомеханические расчёты приводят к следующей зависимости сечений реакций D-D и D-T от энергии частиц (упрощенно) :

$$\sigma_{D-D} \text{ (барн)} \approx \frac{300}{E} \cdot e^{-\frac{46}{\sqrt{E}}}; \quad \sigma_{D-T} \approx \frac{2 \cdot 10^4}{E} \cdot e^{-\frac{46}{\sqrt{E}}}.$$

где E – энергия в кэВ. Из формул видно, что:

- сечение σ_{D-T} примерно в 100 раз превышает σ_{D-D} ;
- при малой энергии частиц сечение экспоненциально мало;
- сечение имеет максимум.

В результате реакция D с T – первый претендент для УТС. В ней в соответствии с массами получающихся частиц 20 % энергии выделяется с α -частицей, 80% - с нейтроном, соответственно из 17.6 МэВ энергии на долю α -частиц приходится 3.5 МэВ, на долю нейтронов – 14.1 МэВ.

Энергия α -частиц в термоядерном реакторе поглощается в плазме, а нейтрон передаёт свою энергию окружающим плазму материалам – первой стенке, бланкету и защите. При поглощении термоядерного нейтрона происходит активация материалов, однако её уровень существенно ниже, чем в случае использования реакций деления.

Необходимые условия реализации УТС

Сечение ионизации в 10^8 раз больше, чем сечение синтеза; энергия ионизации ~ 30 эВ; энергия, выделяющаяся при синтезе ~ 15 МэВ. Поэтому синтез методом бомбардировки дейтронами из ускорителя мишени энергетически невыгоден.

Для достижения положительного выхода энергии при протекании реакций синтеза нужно исключить ионизацию. Реакции синтеза должны протекать в ионизованном газе, нагретом до высокой температуры, т.е. в высокотемпературной плазме. В этом случае говорят не просто о процессе синтеза ядер, а о термоядерном синтезе.

Под реализацией термоядерного синтеза обычно понимают достижение параметров плазмы, при которых выделившаяся при реакциях синтеза энергия превышает вложенную (самоподдерживающееся горение плазмы). Это накладывает определённые условия на концентрацию плазмы n , температуру T , и на энергетическое время жизни плазмы τ_E . Условия самоподдерживающегося горения плазмы впервые были сформулированы английским физиком Лоусоном и получили название критерия Лоусона.

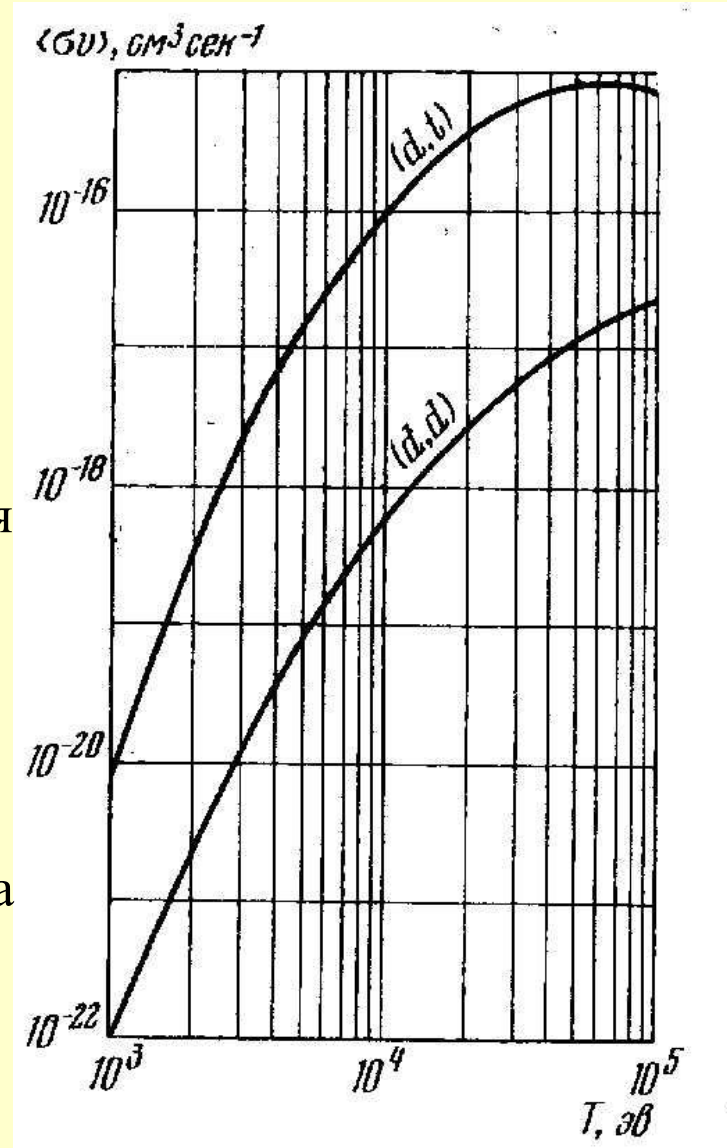
Скорость реакции

Скорость реакции определяется соотношением $n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$, где n – плотность исходных ядер.

Скорость реакций синтеза сильно зависит от энергии частиц, поэтому при подсчёте числа реакций синтеза важно усреднение по распределению частиц по скоростям. Это распределение в термоядерной плазме должно быть близко к Максвелловскому. Соответствующая функция распределения

частиц по скоростям имеет вид $f(v) \sim \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$

Параметр, определяющий скорость реакций – $\langle \sigma v \rangle$, усредненный по Максвелловскому распределению ($\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v) \cdot v \cdot f(v) \cdot dv$), приведен на графике.



Мощность энерговыделения

Мощность энерговыделения от реакций синтеза Q_f может быть представлена в виде

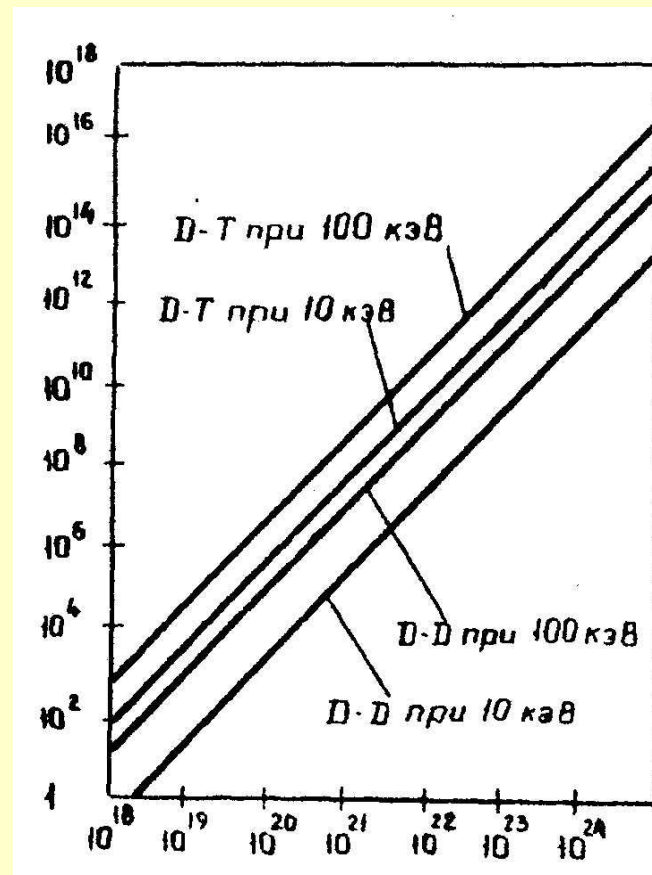
$$Q_f = \int n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle E_f dV_p$$

где интегрирование ведётся по объёму плазмы V_p ; n_1 , n_2 – плотности реагирующих частиц; E_f – энергия, выделяющаяся в одном акте синтеза.

Мощность энерговыделения Q_f/V_p для двух реакций синтеза от плотности n при температуре 10 и 100 кэВ приведена на графике.

Из него видно, что: 1) при небольшом n (10^{18} м^{-3}) плотность мощности столь мала (1 кВт/м³), что реактор с мощностью 1000 МВт оказывается

неприемлемых размеров (10^6 м^3); 2) при очень больших n (10^{25} м^{-3}) плотность мощности настолько велика (10^{15} Вт/м^3), что стационарный теплоотвод становится невозможным из-за отсутствия необходимых конструкционных материалов; 3) для перспективных материалов для стационарно работающего реактора разумным оказывается значение объёмной мощности энерговыделения $\sim 10 \text{ МВт/м}^3$. В этом случае значение плотности составляет $10^{20} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$.



Баланс энергии

Рассмотрим баланс между источниками нагрева и потерь плазмы на примере D-T реакции. В ней 80 % энергии уносится нейтронами, 20 % выделяется с α -частицами. Примем, что энергия α -частиц полностью поглощается в плазме, тогда мощность нагрева плазмы продуктами термоядерных реакций составит:

$$Q_{\text{heat}} = E_{\alpha} n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT} \cdot V_P$$

При этом максимум достигается при $n_D = n_T = n$.

Имеется два основных канала потерь из плазмы:

ТЕПЛОВЫЕ

потери $Q_{\text{тепл}} \approx 4.8 \cdot 10^{-42} \cdot n T \tau_E^{-1} V_P$, [МВт, м⁻³, кэВ, с, м³] потери на
излучение $Q_{\text{рад}} \approx 5.3 \cdot 10^{-43} \cdot n^2 \cdot T^{1/2} V_P$ [МВт, м⁻³, кэВ, с, м³] (без примесей).

Если приравнять источники нагрева и потерь в плазме, то можно получить **физический критерий Лоусона** (условие самоподдерживающегося горения)

$$n \tau_E = \frac{T}{c_1 \cdot \langle \sigma v \rangle - c_2 \cdot T^{1/2}}$$

левая часть критерия является функцией произведения плотности плазмы на время удержания $n \tau_E$, правая – зависит только от температуры плазмы, c_1, c_2 – постоянные.

Анализ критерия Лоусона

Анализируя формулу критерия Лоусона, можно сделать такие основные выводы:

- Имеется минимальная температура плазмы, ниже которой не может быть самоподдерживающейся реакции синтеза. Для D-T смеси $T_{\min} \approx 4.5$ кэВ, для D-D реакции $T_{\min} \approx 25$ кэВ.
- Минимуму $n\tau_E$ соответствует температура $T_{\text{opt(D-T)}} \approx 20-30$ кэВ, или $T_{\text{opt(D-D)}} \approx 100$ кэВ
- Минимальное значение $n\tau_E$ составляет соответственно $n\tau_{E(D-T)} \approx 2 \cdot 10^{20}$ с/м³, или $n\tau_{E(D-D)} \approx 50 \cdot 10^{20}$ с/м³

Если говорить более точно, то Лоусон вывел свой критерий, имея в виду не только плазму, а всю термоядерную электростанцию.

При этом предполагалось, что часть мощности, выделяемая в нейтронах, а также теряемая за счёт излучения и тепловых потерь на стенку, может быть возвращена в плазму и использована для её нагрева.

В этом случае в термоядерном реакторе величина требуемого критерия Лоусона может быть несколько снижена.

Зависимость от температуры

В интервале температур 7-20 кэВ скорость D-T реакции зависит от температуры как $\langle \sigma v \rangle \sim T^2$. Поэтому при температурах, превышающих минимальную, $n\tau_E \sim T^{-1}$ или $nT\tau_E \approx \text{const}$.

Тогда можно вывести упрощенную форму записи критерия Лоусона для D-T реакции:

$$nT\tau_E \geq 20 \cdot 10^{20} \text{ кэВ} \cdot \text{с}/\text{м}^3$$

Отсюда при температур плазмы $T = 10$ кэВ следует условие на произведение $n\tau_E$

$$n\tau_E \geq 2 \cdot 10^{20} \text{ с}/\text{м}^3$$

Критерий Лоусона и типы реакторов

Для удержания высокотемпературной плазмы предложено два основных подхода:

- стационарные системы с использованием сильных магнитных полей для термоизоляции плазмы от стенок (термоядерный синтез с **магнитным удержанием** плазмы)
- импульсные системы с удержанием плазмы в течение времени её инерционного разлёта (термоядерный синтез с **инерционным удержанием** плазмы)

В термоядерном реакторе с магнитным удержанием характерные параметры составляют

$$n \approx 10^{20} \text{ м}^{-3}, \tau_E \geq 2 \text{ с}$$

т.е. требуемое энергетическое время жизни плазмы должно исчисляться секундами.

В реакторе с инерционным удержанием концентрация плазмы на много порядков больше (оно превышает плотность твёрдого тела), а требуемое время удержания наносекундного масштаба

$$n \approx 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}, \tau_E \sim 10^{-8} - 10^{-9} \text{ с}$$

1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Квазинейтральность плазмы

Плазма –ионизованный газ, в котором выполняется условие квазинейтральности.

Что такое "квазинейтральность"? (т.е. "почти" нейтральность). При усреднении по любому макроскопическому объёму плазма является нейтральной, $\langle n_e \rangle = \langle \sum_i Z_i n_i \rangle$. Однако она состоит из ионизованных частиц и вблизи этих частиц должно проявляться отличие от нейтральности. В результате мы приходим к необходимости введения некоторого размера λ_D , такого, что на расстояниях $\ll \lambda_D$ в ионизованном газе видна структура заряженных частиц, а на расстояниях $\gg \lambda_D$ этот газ в среднем нейтрален.

Пусть на длине λ_D в плазме произошло пространственное разделение зарядов и образовался «конденсатор». Тогда, если приравнять плотность энергии, запасённой в электрическом поле такого конденсатора, тепловой энергии плазмы, то можно получить оценку дебаевского радиуса λ_D .

$$\lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \approx 2.4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_e}{n_e} \right) \quad [\text{м, кэВ, } 10^{20} \text{ м}^{-3}]$$

При параметрах реактора ($T_e = 10$ кэВ, $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$) $\lambda_D \approx 10^{-4}$ м.

Дебаевский радиус – это по сути дела радиус экранирования зарядов в плазме.

В плазме дебаевский радиус должен быть много меньше её размеров.

Плазменная частота

Если поделить дебаевский радиус на скорость частицы, то получится временной масштаб разделения зарядов. Обратная величина называется *плазменной* или *ленгмюровской частотой*, с которой колеблются частицы плазмы при разделении зарядов. Для электронов и ионов плазмы эта частота различна:

$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} = 5.6 \cdot 10^{11} n_e^{1/2} \quad [\text{с}^{-1}, 10^{20} \text{ м}^{-3}]$$

$$\omega_{pi} = \left(\frac{Z^2 n_i e^2}{\epsilon_0 m_i} \right)^{1/2} = 1.32 \cdot 10^{10} \sqrt{\frac{Z^2 n_i}{A_i}}$$

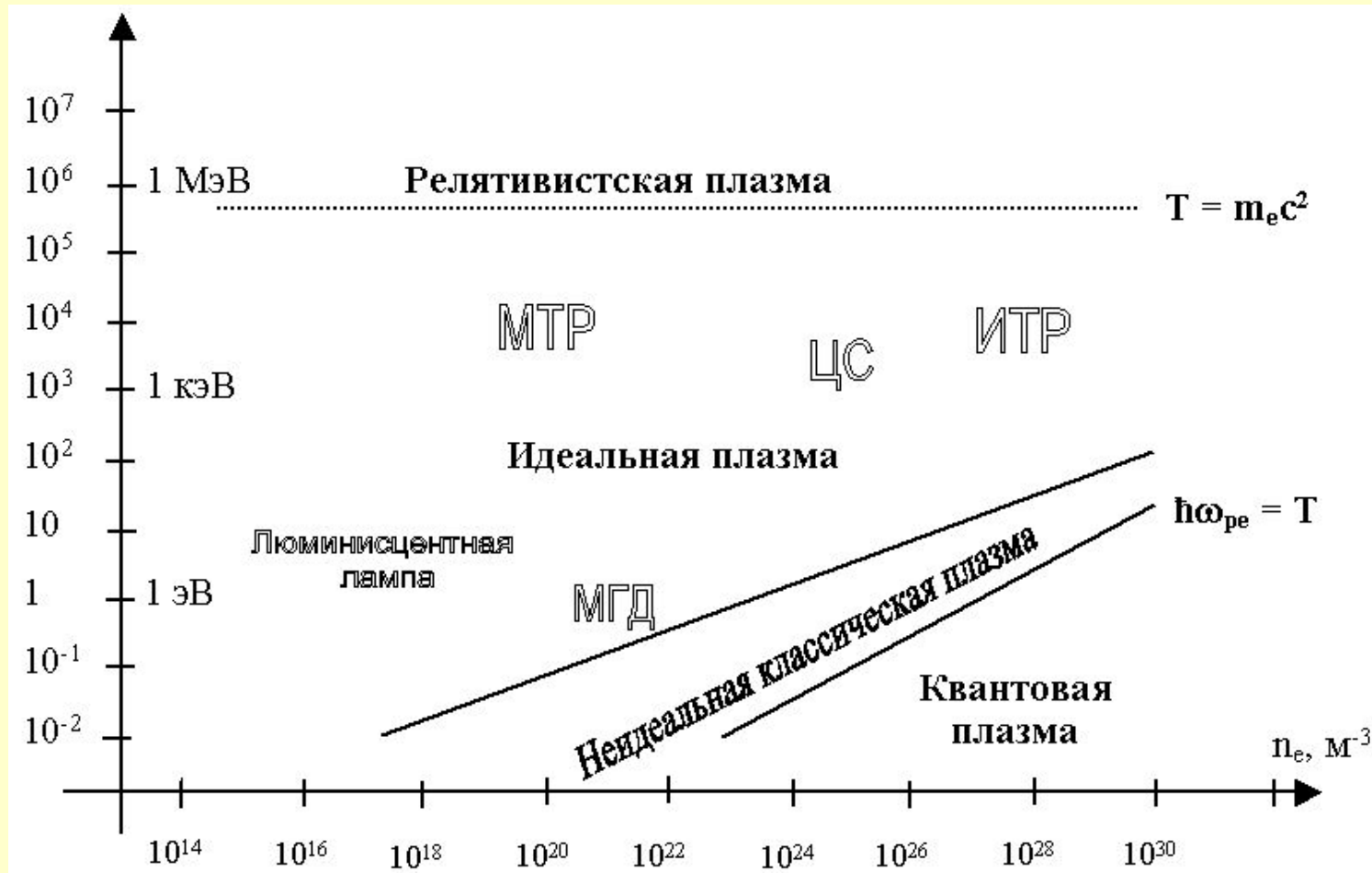
Виды плазмы

В ионизированном газе, состоящем из заряженных частиц, электрические поля определяют масштаб разделения зарядов, характеризующийся дебаевским радиусом λ_D . Кроме этой характерной длины можно ввести также несколько других пространственных масштабов: расстояние между заряженными частицами, $r_{ne} \sim n_e^{-1/3}$; характерный размер области, занимаемой ионизованным газом, a .

Плазма – ионизованный газ, в котором дебаевский радиус много меньше характерного размера $\lambda_D \ll a$. Под ионизованным понимают газ, в котором средняя тепловая энергия частиц T превышает потенциал ионизации I (для атома водорода $I \approx 13.6$ эВ). При $T \ll I$ газ является слабоионизованным.

При различных соотношениях между длинами λ_D , r_{ne} и некоторыми другими параметрами в плазме могут проявляться квантовые свойства, эффекты неидеальности и т.д.

Виды плазмы (схема)



МТР и ИТР – реактор с магнитным и инерционным удержанием плазмы;

МГД – магнитогидродинамический генератор;

ЦС – центр Солнца

Удержание высокотемпературной плазмы

При температуре плазмы, характерной для термоядерного реактора и составляющей 10 – 100 кэВ (сотни миллионов градусов (!)) удержание плазмы материальными стенками невозможно.

В магнитном поле движение заряженной частицы приобретает особенности, позволяющие удерживать их от быстрого ухода на стенки.

Уравнение движения частицы в магнитном поле имеет вид (пусть B вдоль z):

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

Из него следует, что в направлении вдоль B частица движется так, как будто магнитного поля нет. А в направлении поперёк поля можно написать:

$$\frac{dv_{x,y}}{dt} = \omega_c \cdot v_{y,x} \quad \omega_c = \frac{ZeB_z}{m}$$

где ω_c - *циклотронная* или *ларморовская частота*.

Отсюда следует, что в плоскости xu частица движется по окружности радиусом

$$\rho = v_{\perp} / \omega_c - \text{ларморовский радиус.}$$

Оценка ларморовского радиуса

В D-T плазме с $T = 10$ кэВ при $B = 5$ Т имеем $\omega_{ce} \approx 8.8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$; $\omega_{ci} \approx 1.92 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$, и $\rho_e \approx 6.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$; $\rho_i \approx 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При одинаковой температуре ларморовский радиус иона в $\sqrt{m_i / m_e}$ раз больше, чем электрона.

Эти величины уже существенно меньше характерных размеров реактора (метры). Однако остаётся проблема удержания плазмы *вдоль* поля. Её решают либо путём искривления магнитной конфигурации в тор, как бы замыкая концы (**тороидальные системы** магнитного удержания), либо увеличением магнитного поля на концах установки (**пробочные ловушки**).

В результате, для решения проблемы удержания плазмы вдоль магнитного поля, оно должно быть неоднородным.

Магнитное давление

Одним из важнейших параметров плазмы является отношение газокинетического и магнитного давлений, $\beta = p/p_M$, где $p = n_e T_e + n_i T_i = 1.6 \cdot 10^{-2} \cdot (n_e T_e + n_i T_i)$ [МПа, 10^{20} м⁻³, кэВ] – газокинетическое давление плазмы, $p_M = B^2/2\mu_0 = 0.4 \cdot B^2$ [МПа, Тл] – давление магнитного поля.

Пусть $T_e = T_i = 10$ кэВ, а плотность $n_e = n_i = 10^{20}$ м⁻³. Тогда давление плазмы $p \approx 0.32$ МПа = 3.2 атм.

Для пробочной ловушки $\beta = 50-100\%$ при $B \approx 1$ Тл; в токамаке ITER $\beta = 2.5\%$ при $B \approx 5$ Тл; в сферических токамаках β достигает 30% .

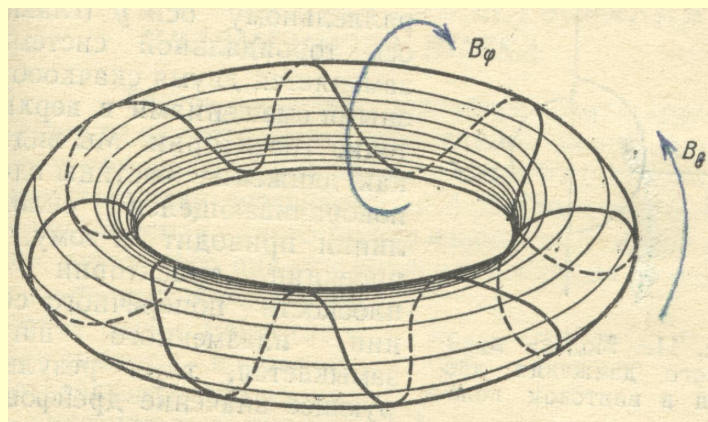
Мощность, выделяющаяся при реакциях синтеза:

$$Q_f \sim n^2 T^2 V_P \sim p^2 V_P \sim \beta^2 B^4 V_P \quad \text{«набирается» в}$$

обычных токамаках с низким значением β за счёт большой величины B при сравнительно небольшом значении β ; в сферических токамаках с высоким значением β - за счёт величины β при сравнительно небольших B в плазме.

Дрейфы и вращательное преобразование

В неоднородном магнитном поле и в скрещенных электрическом и магнитном полях заряженные частицы испытывают дрейфы. Из-за этого плазма может придать в движение, то есть дрейф затрудняет удержание плазмы. Выход состоит в создании **вращательного преобразования** – суперпозиции тороидального и полоидального магнитных полей.



В зависимости от способа создания вращательного преобразования в тороидальной ловушке, тороидальные установки делятся на **токамаки** (вращательное преобразование создаётся текущим по плазме тороидальным током) и **стеллараторы** (вращательное преобразование создаётся внешними винтовыми проводниками).

Неустойчивости плазмы

Плазма, нагретая до высоких температур и помещённая в магнитную ловушку весьма далека от термодинамического равновесия – имеется большой перепад температуры и плотности от центра плазмы к материальной стенке. Различные коллективные движения могут приводить к разного рода неустойчивостям.

Особо опасны МГД-неустойчивости, когда происходят макроскопические нарушения формы плазменной конфигурации, и плазма перемещается как целое. Существуют также кинетические неустойчивости (неустойчивости в пространстве скоростей) – микронеустойчивости, выражающиеся в отклонении формы функции распределения от максвелловской.

Для удержания плазмы необходимо создать конфигурацию с минимумом магнитного поля B (т.е конфигурацию, в которой магнитное поле в плазме растёт всюду от центра плазмы). В этом случае подавляются наиболее опасные виды неустойчивостей плазмы. Для уменьшения опасности микронеустойчивостей оказалось важным введение шира (перекрещенности силовых линий).

В настоящее время найдены методы борьбы с наиболее опасными неустойчивостями в плазме. Однако осталось много разного рода микронеустойчивостей, которые проявляются в виде повышенного переноса плазмы.

1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Токамак

ТОКАМАК - ТОроидальная КАмера МАгнитная Катушка.

Токамак представляет собой *тороидальную магнитную систему* для удержания высокотемпературной плазмы;

удержание осуществляется конфигурацией магнитного поля с минимумом B за счёт полоидального B_p и тороидального B_t магнитного поля;

равновесие и требуемая *форма* плазмы обеспечиваются системой полоидальных полей;

нагрев осуществляется током, текущим по плазме, а также внешними источниками нагрева, а при высокой температуре плазмы – заряженными продуктами реакций синтеза.

История развития токамаков

1950-1951 – предложена идея магнитного удержания (И.Е.Тамм, А.Д.Сахаров).

1951 – проведены расчёты реактора, получены следующие параметры: большой радиус тора $R = 12$ м, малый $a = 2$ м, тороидальное магнитное поле $B = 5$ Тл; топливо – D-D

1958 – создан Токамак-1. Получено подтверждение теории – увеличение B улучшает устойчивость шнура. Необходима борьба с примесями.

1962 –токамак ТМ-2. К.А.Разумовой и Е.П.Гобуновым получена устойчивая плазма в течение всего разряда (2 мс) при большом поле и малом токе. При повышении тока возникала неустойчивость – срыв с выбросом плазмы на стенки. Начато изучение и классификация различных неустойчивостей.

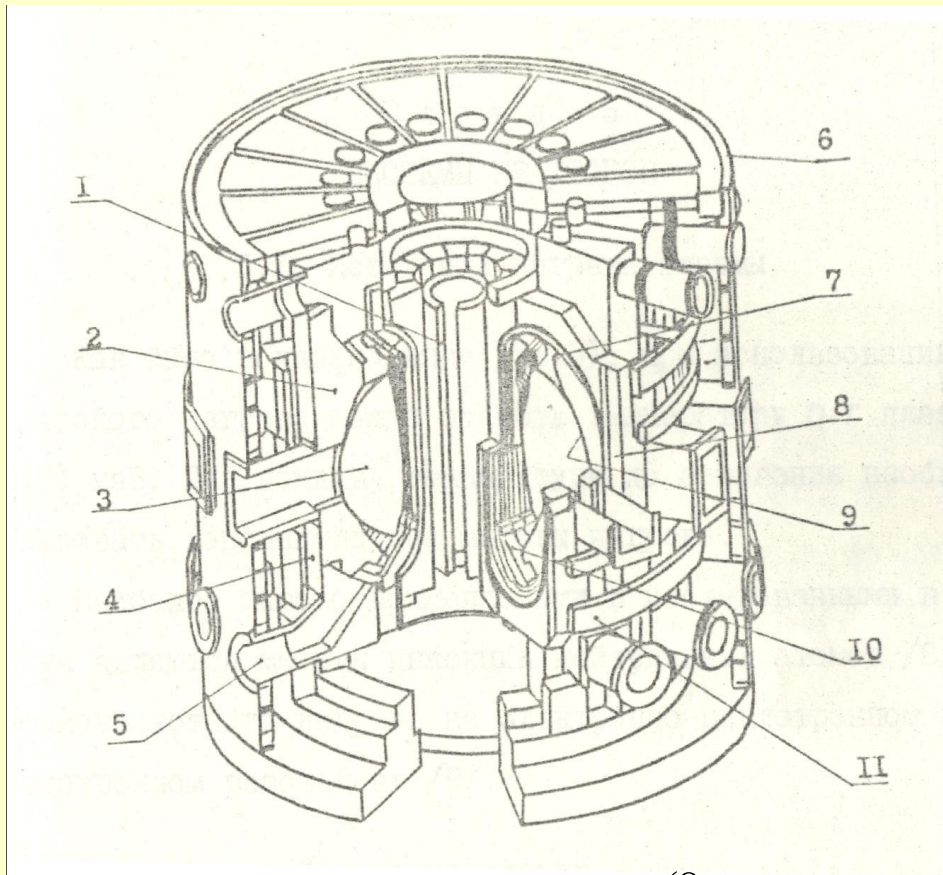
1968 – токамаки стали строиться по всему миру. Показана необходимость дополнительных к омическому методов нагрева плазмы.

1980-е – в Т-10 впервые применён ЭЦР нагрев плазмы, что позволило достичь температуры 90 млн. градусов

1990 – в Т-15 мощность систем нагрева достигла 19 МВт.

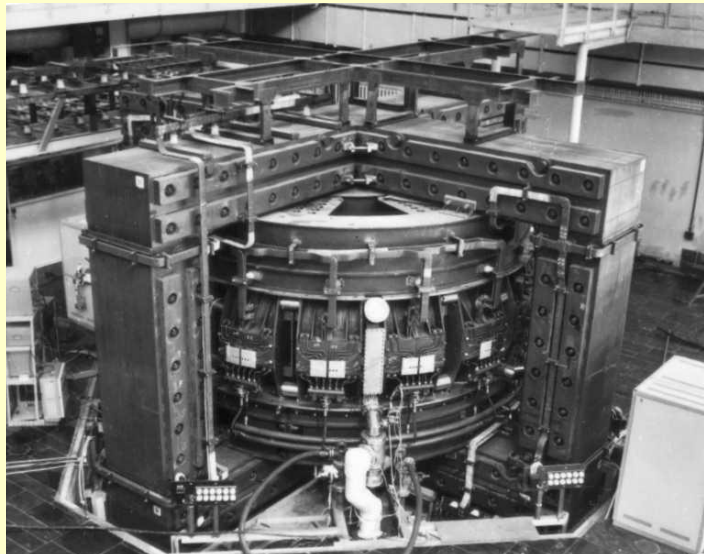
2006 – подписано соглашение о строительстве международного токамака-реактора ITER во Франции.

Общий вид токамака на примере ITER



3 – плазма, **тороидальная магнитная система** (8 – катушки тороидального поля, 6 - криостат), **полоидальная магнитная система** (1 – центральный соленоид, 7, 11 – катушки управления), **вакуумная система** (4 – вакуумная камера, 5 – патрубков вакуумной откачки), 2 – защита, **внутрикамерные элементы, воспринимающие тепловые нагрузки** (9 – первая стенка, 10 – диверторные пластины), **система дополнительного нагрева и система подачи топлива** (осуществляется через патрубки).

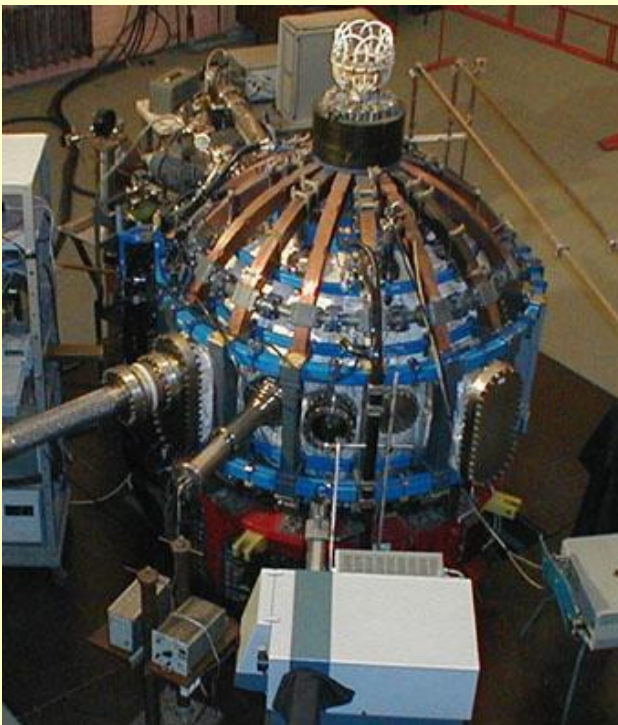
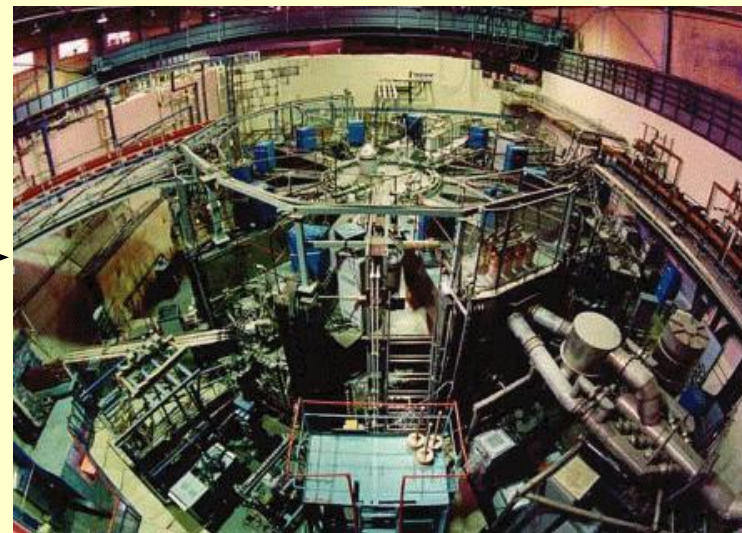
Внешний вид некоторых токамаков



T-10, 1975
 (I очередь)

T-15

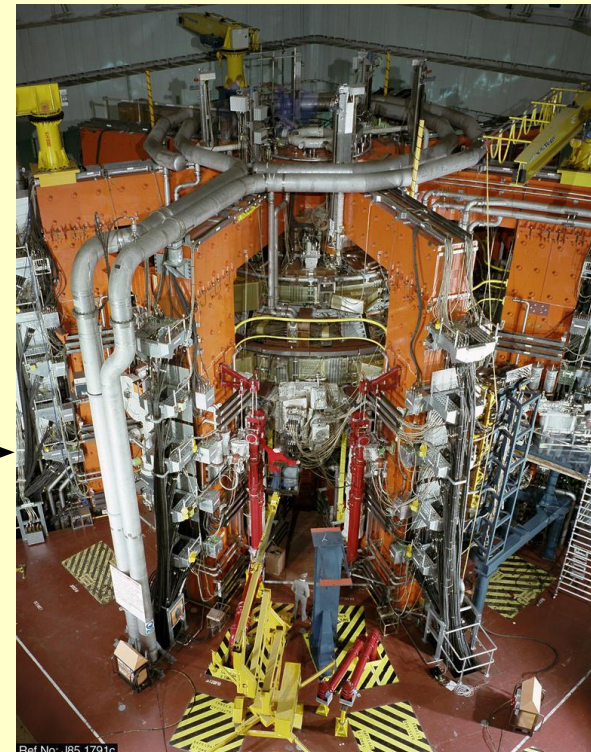
Оба – РНЦ
 «КИ», Москва,
 Россия



Глобус – М
 ФТИ, СПб,
 Россия

JET

Великобритания



Основные барьеры на пути достижения термоядерных параметров плазмы в токамаке

- Излучение примесей
- Срывы плазмы
- Неустойчивости плазмы
- Проблемы удержания плазмы
- Пределы по равновесию плазмы
- Особенности подпитки топливом (газонапуск и инжекция пеллетов)
- Ограниченная мощность систем нагрева

1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
- 5. ITER**
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Цели ITER

Исследования на крупнейших токамаках (JET, TFTR, JT-60U, Tore-Supra, T-15, DIII-D и др.) позволили вплотную приблизиться к параметрам термоядерного реактора. Решающим шагом на этом пути стал проект международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, создаваемого с 1988 г. усилиями России, США, Японии и объединённой Европы. Впоследствии к этим основным участникам работы присоединились Казахстан и Канада, а в 2003 г. – Китай и Южная Корея.

Основной целью создания ИТЭР является демонстрация научной и технической осуществимости термоядерной энергетики. Эта задача включает в себя демонстрацию:

- ✓ зажигания и горения d-t плазмы в установившемся режиме;
- ✓ реализуемости в одной установке конструктивных решений систем реактора;
- ✓ обеспечения требуемого ресурса и безопасности работы реактора;
- ✓ решение конструктивных и технологических проблем для демонстрационной термоядерной электростанции (DEMO) и термоядерной энергетики.

Параметры ITER

- ✓ Большой радиус плазмы R , м – 6.2
- ✓ Малый радиус плазмы a , м – 2.0
- ✓ Тороидальное поле на оси B_{t0} , Тл – 5.3
- ✓ Ток плазмы I_p , МА – 15
- ✓ Энергетическое время жизни τ_E , с – 3.7
- ✓ Средняя температура плазмы T , кэВ – 8
- ✓ Средняя концентрация плазмы n , 10^{20} м^{-3} – 1.0
- ✓ Мощность реакций синтеза P_{fus} , МВт – 500
- ✓ Мощность дополнительного нагрева плазмы P_{aux} , МВт – 50
- ✓ Длительность импульса горения, с – 400

Организация проекта ITER

Проект ИТЭР с самого начала развивался как крупный международный проект при участии ведущих стран – участниц в исследованиях по магнитному удержанию плазмы (США, Россия, Европейское сообщество, Япония). При этом были в полной мере оценены и задействованы пионерские наработки СССР по токамакам.

В России в проекте ИТЭР участвовало более 200 организаций и учреждений. Отметим ведущую роль четырёх российских организаций в исследованиях и разработках по проекту ИТЭР:

- РНЦ "Курчатовский институт" – физика плазмы, диагностика, системы нагрева, безопасность;
- НИИЭФА им. Д.В.Ефремова – инженерно-физические системы ИТЭР (электромагнитная система, вакуумная камера, дивертор);
- НИКИЭТ – ядерно- физические системы ИТЭР (защита);
- ВНИИНМ – сверхпроводниковые и конструкционные материалы

21 ноября 2006 года в Париже подписано соглашение по ITER!!!

14 октября 2007 года начато строительство в Кадараше (под Ниццей)

Этапы работ на ITER

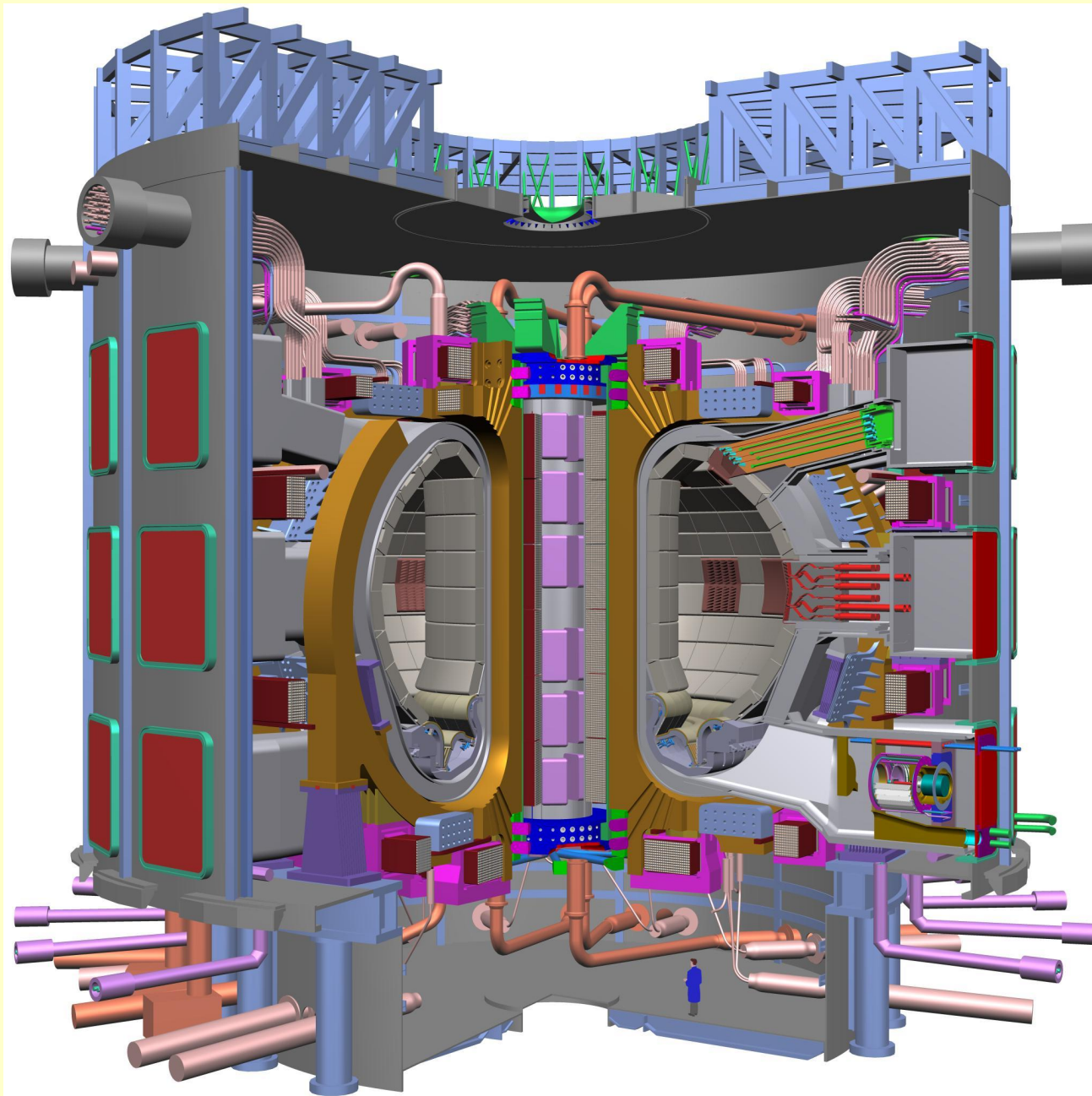
Первая стадия (водородная). На этой стадии должна использоваться водородная плазма. Вклад от термоядерных реакций пренебрежим. Должна быть проверена работа всех систем токамака, достигнуты требуемые тепловые нагрузки на элементы дивертора, проверена надёжность работы подсистем реактора при номинальных электромагнитных нагрузках.

Вторая стадия (дейтериевая). На этой стадии вклад от термоядерных d-d реакций мал, но он уже позволит проверить характеристики работы защиты.

Третья стадия (дейтериево-тритиевая). На этой стадии предполагается достижение основных целей установки. Термоядерные реакции, протекающие в плазме, должны позволить провести испытания модулей blankets.

Суммарное число полномасштабных импульсов, требующихся для выполнения указанной программы – около $3 \cdot 10^4$.

Проектный внешний вид ITER



1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Альтернативные системы с магнитным удержанием плазмы

Токамак – лидер в исследованиях по УТС.

В то же время мировое сообщество считает целесообразным затрачивать 10–20 % всех ассигнований в УТС с магнитным удержанием на т.н. **альтернативные системы**.

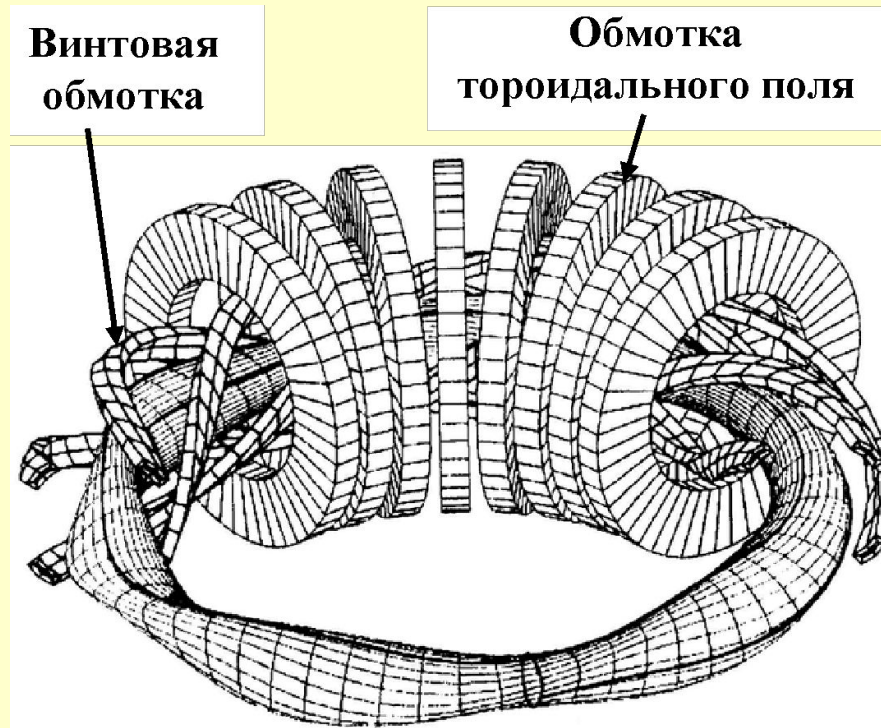
Эти системы имеют ряд потенциальных преимуществ перед токамаками. Вопрос в том – смогут ли быть реализованы эти преимущества?

Основные альтернативные системы магнитного удержания:

- стеллараторы
- открытые ловушки
- сферوماки
- пинчи

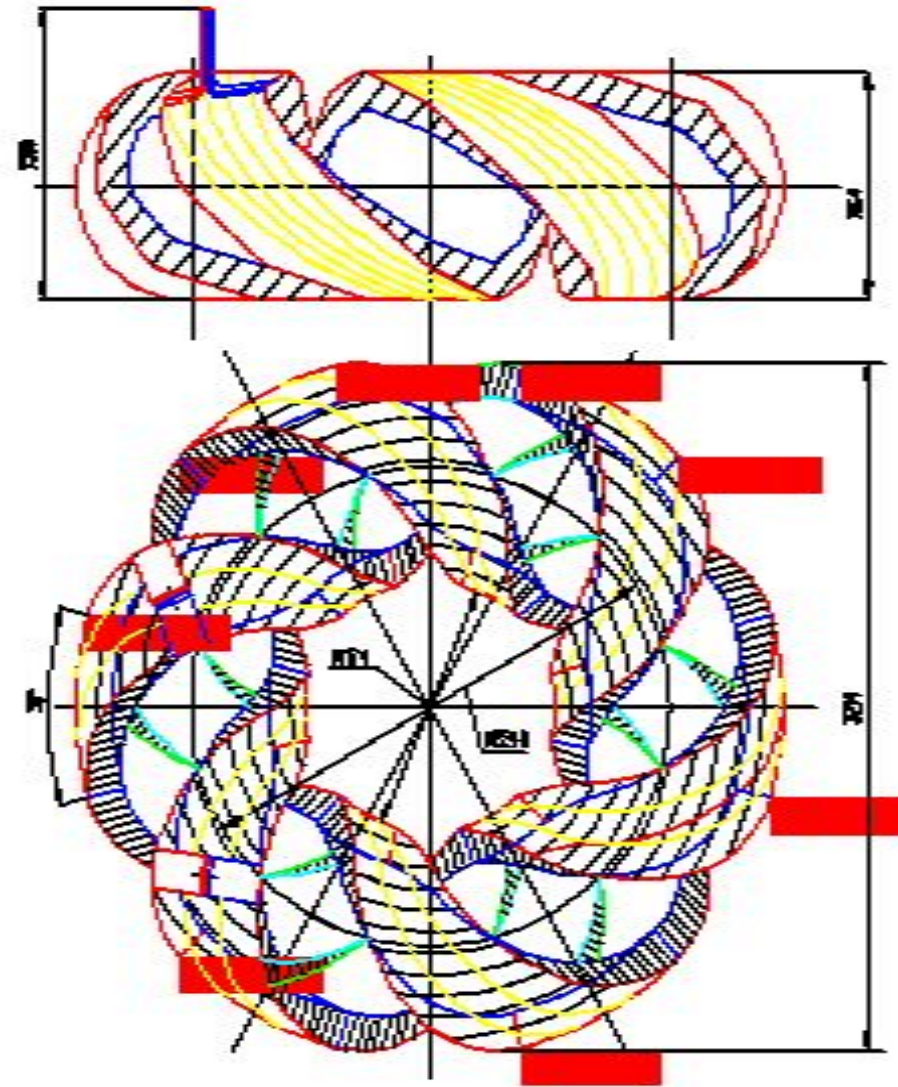
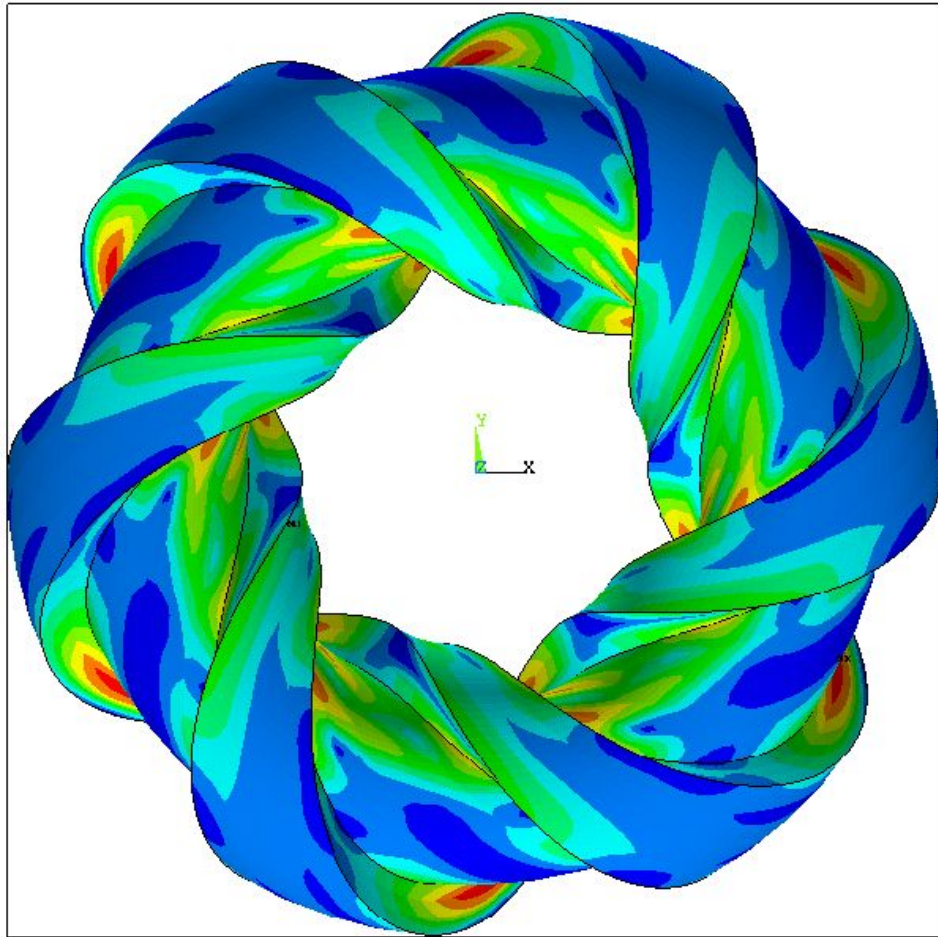
Стелларатор

Стелларатор – ближайшая к токамаку замкнутая система магнитного удержания плазмы. Основное отличие – в способе создания вращательного преобразования – если в токамаке оно создается током, текущим по плазме, то в стеллараторе - внешними винтовыми обмотками.



Классический стелларатор с непрерывной винтовой обмоткой

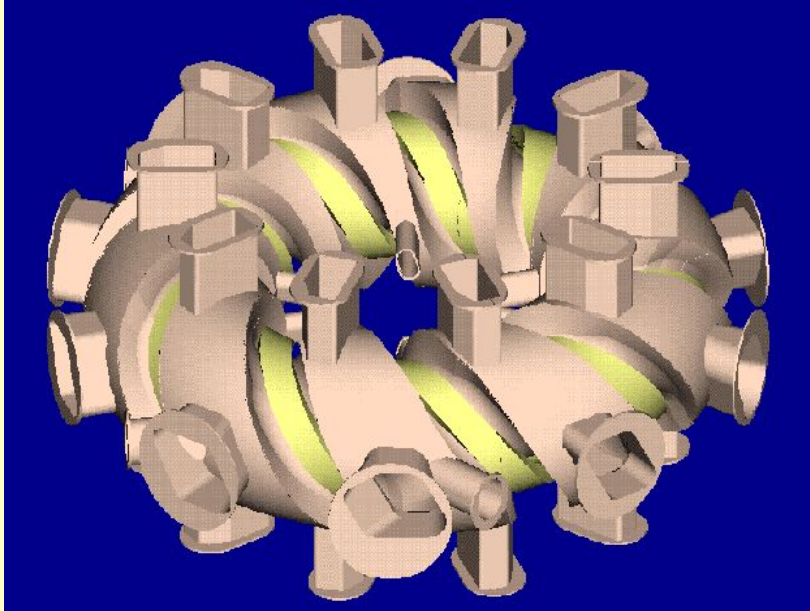
Российские стеллараторы



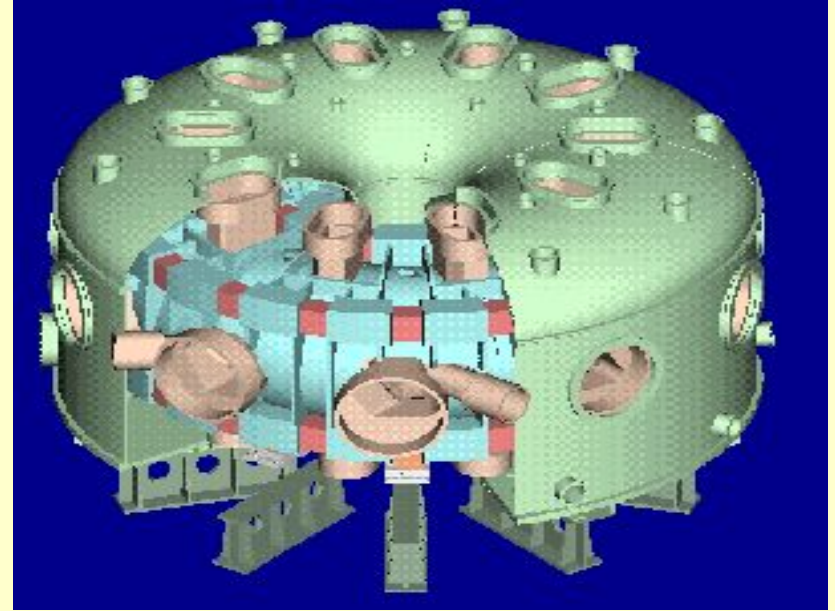
Россия: **Л-5**: $R = 1.12$ м, $a = 0.3$ м,
 $B = 2$ Т, мощность нагрева 5 МВт

Современные стеллараторы

Япония: **LHD** (Large Helical Device): $R = 3.9$ м, $a_p = 0.6$ м, $B = 4$ Т



Камера с винтовой обмоткой



Установка в сборе

Германия: **Wendelstein-7X**: $R = 5.5$ м, $a = 0.55$ м, $B = 3$ Т; мощность нагрева: $P_{ECRH} \approx 10$ МВт (стац.), $P_{NBI} \approx 5$ МВт, $P_{ICRH} \approx 4$ МВт по 10 с

Преимущества стеллараторов

Исследования параметров стелларатора-реактора проводятся в России, Украине, Германии, Японии, США.

В стеллараторах **токовых неустойчивостей нет** (в отличие от токамаков, где они играют важную роль в ограничении параметров плазмы), но возможны другие неустойчивости.

Длительность импульса разряда определяется длительностью импульса нагрева, то есть это изначально стационарная система (в отличие от токамаков, где длительность разряда определяется запасом потока в соленоиде).

Пример параметров реактора на основе Wendelstein-7X

	Wendelstein	ITER
Большой радиус плазмы R , м	22	6.2
Малый радиус плазмы a , м	1.85	2
Тороидальное магнитное поле B , Т	5	5.3
Объём плазмы V_P , м ³	1400	840
Энергия магнитного поля W_M , ГДж	100	40

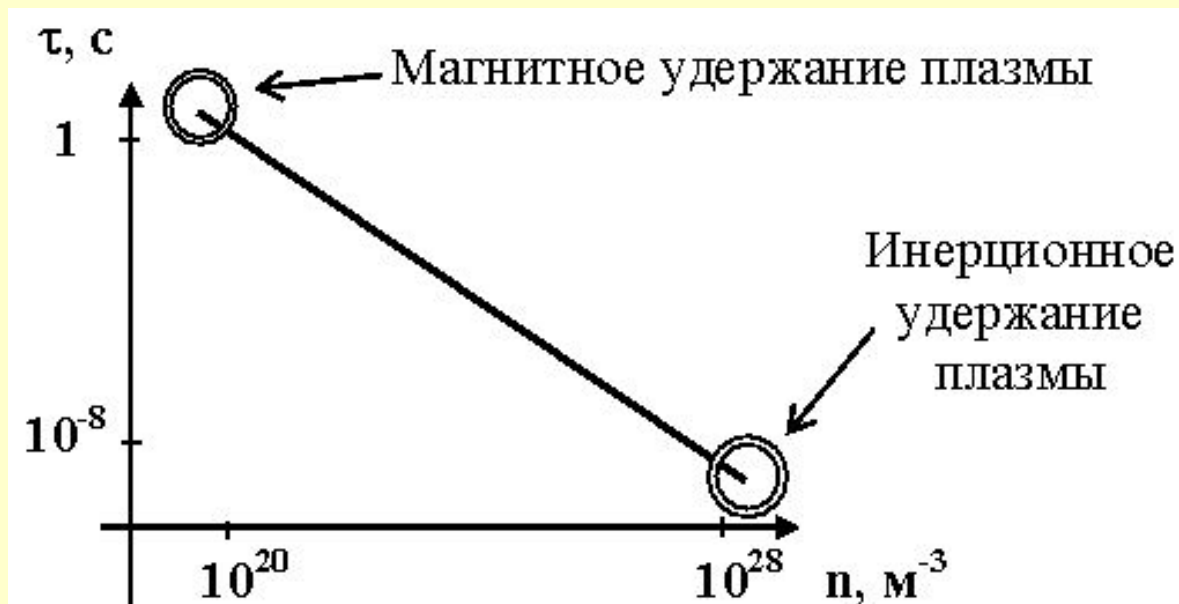
1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

Понятия ИУТС

В достаточно плотной плазме без магнитного поля достижение критерия Лоусона возможно в течение времени её инерционного разлёта, определяемого тепловой скоростью ионов плазмы v_{Ti} (при температуре 10 кэВ $v_{Ti} \approx 10^6$ м/с). При радиусе мишени $R \approx 1-2$ мм время инерционного разлёта составляет

$$\tau_D \approx R/v_{Ti} \approx (1-2) \cdot 10^{-9} \text{ с, при концентрации } n \sim 10^{29} \text{ м}^{-3}.$$

Схема осуществления термоядерной вспышки такова: за очень короткое время холодная D-T смесь, ограниченная оболочкой, сжимается, нагревается до термоядерных температур и затем, в течение времени её гидродинамического разлёта, в плазме протекают интенсивные термоядерные реакции.



Особенности ИУТС

Реактор инерциального синтеза по определению является импульсным, в нём термоядерная энергия выделяется в виде последовательности вспышек. Уровень энергии синтеза в отдельной вспышке в рассматриваемых проектах инерциального УТС составляет порядка 1 ГДж, что соответствует энергии взрыва массы химического ВВ менее 250 килограмм. В этом существенное отличие от взрывов ядерного и термоядерного оружия, где выход энергии по крайней мере в 10^4 - 10^5 раз больше.

При анализе физических принципов инерциального синтеза важнейшими понятиями являются мишень и драйвер. **Мишень** представляет собой оболочку, внутри которой располагается d-t смесь. **Драйвер** – это внешний источник (лазерные пучки, пучки заряженных частиц или рентгеновское излучение), осуществляющий подвод энергии к мишени, сжатие и нагрев плазмы. Определение оптимальной конструкция мишени и характеристик драйвера являются важнейшими задачами инерциального синтеза.

Параметры мишени и драйвера

Концентрация твёрдого D-T топлива $n_{DT} \approx 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ (соответствующая плотность $\rho \approx 0.2 \text{ г/см}^3$) на 8-9 порядков превышает значение концентрации в случае магнитного удержания плазмы. Поэтому для выполнения критерия Лоусона допустимое энергетическое время составляет $\tau_E \sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. С другой стороны, инерционное время разлёта может быть оценено как $\tau_d \approx R/c_s$. Условие $\tau_d \approx \tau_E$ приводит к значению радиуса мишени $R \approx 2 \text{ мм}$. При таком значении радиуса для синтеза к плазме надо подводить мощность $5 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$ с плотностью 10^{16} Вт/см^2 .

Как энергию, так и мощность, которые требуется подвести к плазме в случае нагрева твёрдого D-T топлива, слишком велики для практической реализации. Тем более если учесть, что КПД драйвера η_D (от сети), как правило, много меньше единицы (обычно $\eta_D \sim 1-3 \%$). При учёте КПД требуемая энергия возрастает.

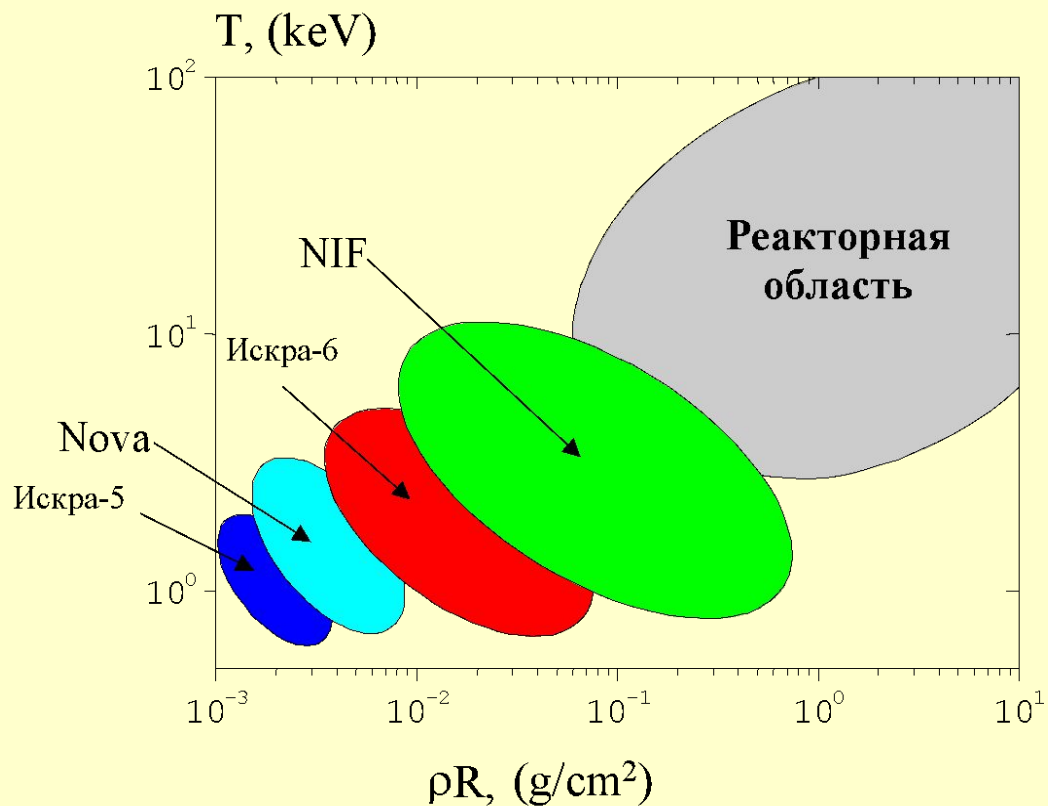
Поэтому для практической реализации энергии термоядерного синтеза требуются существенно бóльшие значения плотности. Выгодна $\rho \sim 100 - 200 \text{ г/см}^3$. Для такого сжатия необходимы давления масштаба $10^{16} - 10^{17} \text{ Па}$ и плотность подводимой энергии $\sim 10^{17} \text{ Вт/см}^2$. Использование взрывчатых веществ и давление света лазера не позволяют достичь таких параметров. Выходом является использование реактивного метода ускорения при испарении внешней поверхности мишени, нагреваемой энергией драйвера.

Процесс ИУТС

Основные стадии сжатия мишени и выделения термоядерной энергии для варианта прямого облучения мишени с помощью лазерного облучения:

- 1) В камеру реакции вбрасывается мишень, которая облучается лазерами.
- 2) При облучении сферической мишени её внешняя поверхность ионизируется и образует вокруг нее плазменную корону.
- 3) Энергия лазера передаётся внутрь мишени. Развивается процесс сжатия.
- 4) Фронт ударной волны обжимает холодное D-T топливо, оно остаётся холодным, но его плотность сильно возрастает.
- 5) При схождении фронтов ударных волн в центре мишени происходит ударный нагрев небольшой области до температур зажигания ≈ 5 кэВ. Поглощение энергии α -частиц приводит к подъёму температуры до 100 кэВ.
- 6) Поглощение энергии α -частиц в соседних слоях поддерживает самонагрев холодной части топлива и инициирует волну термоядерного горения.
- 7) В ходе гидродинамического разлёта плазмы, а также по мере выгорания плазмы, она охлаждается и термоядерные реакции прекращаются.

Достигнутые и планируемые параметры ИУТС

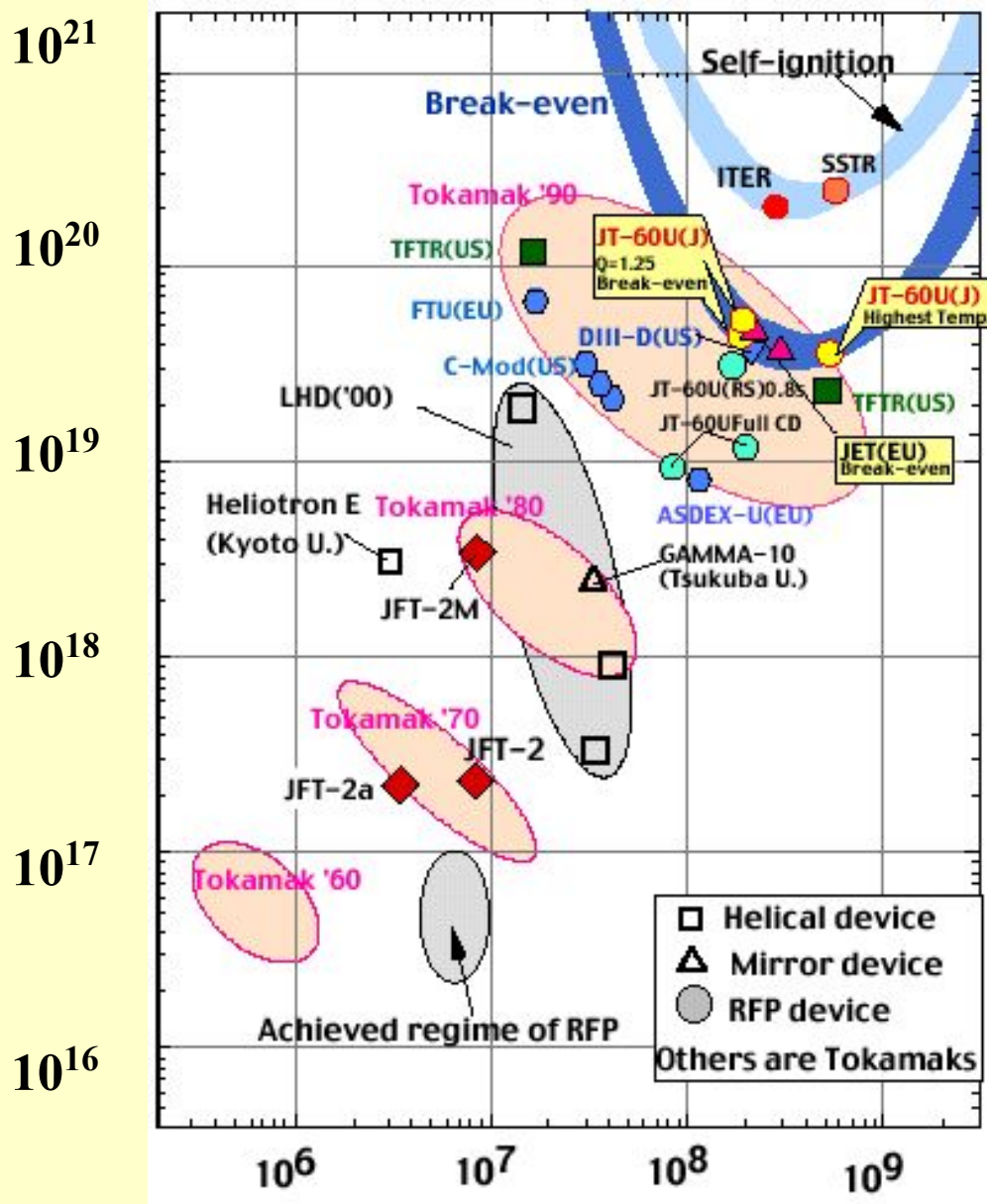


Область существующих и планируемых установок.

1. Основные понятия и реакции синтеза
2. Требования к реактору синтеза, критерий Лоусона
3. Основы теории плазмы
4. Токамаки
5. ITER
6. Стеллараторы
7. Инерциальный термоядерный синтез
8. Повод для оптимизма

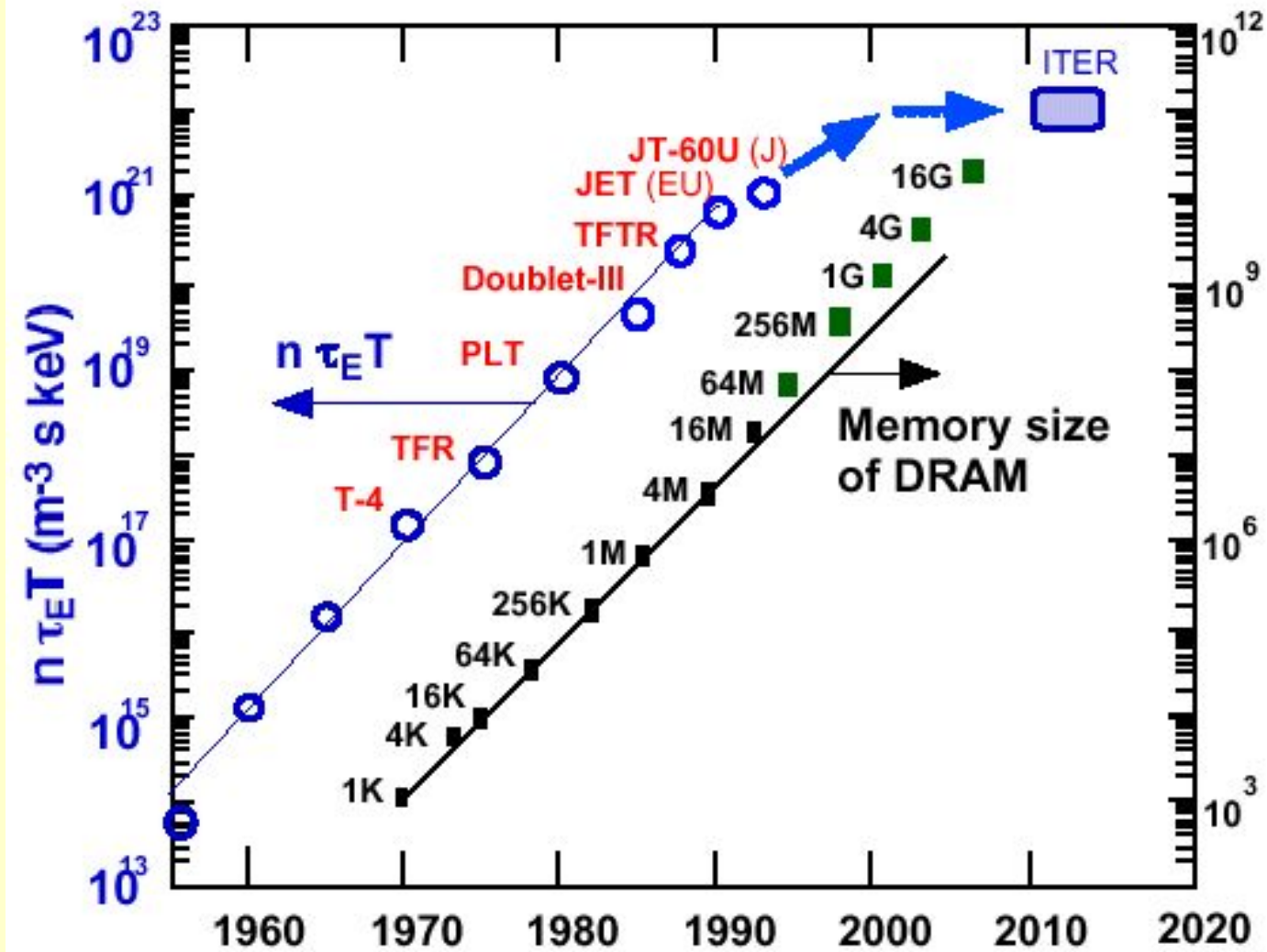
Критерий Лоусона – требуемый и достигнутый

$n \cdot \tau_E, \text{M}^{-3}\text{s}$



T_i, K°

Динамика увеличения параметра $n\tau_E T$



Основные тенденции мировой энергетики

- Мировая экономика в течение нескольких последних лет находится в фазе роста экономического цикла, демонстрируя достаточно высокие темпы роста.
- Рост мирового потребления энергии является следствием роста мировой экономики, возросшей транспортной и промышленной активности.
- Основным источником энергии на планете остается нефть, из которой вырабатывается 36.8% потребляемой энергии.
- Резервные мощности добычи нефти в настоящее время составляют порядка 3 % от мирового потребления. Фактически это означает отсутствие в мире резервов добычи нефти в случае форс-мажора у какого-нибудь крупного производителя нефти.

Основные тенденции мировой энергетики (2)

- Замещение нефти другими традиционными источниками энергии сопряжено со значительными трудностями и возможно не во всех странах. Замещение природным газом требует существенных инвестиций в инфраструктуру транспортировки. Схожая ситуация и с атомными и гидроэлектростанциями. Увеличение потребления угля возможно в странах, где есть существенные его запасы.
- Существенное увеличение добычи нефти в ближайшее время также невозможно.
- Так называемые альтернативные источники энергии еще долгое время не будут занимать в мировом энергетическом балансе места, достойного упоминания. Тем не менее, в их развитие, так же как и в развитие энергосберегающих технологий, несомненно, будут вкладываться значительные средства.