

**ЛЕКЦИЯ 10.
Энергия.**

**Ядерная энергия. Реакции деления.
Термоядерная энергетика. Реакции синтеза.**

А.И. Валишев, В.Г. Сербо.

19. Дефект масс. Дефект масс в ядерных реакциях.

Мировое потребление энергии.

Ежегодно прирост составляет $\Delta = 2,3 \%$.

Упражнение.

Определить время двукратного прироста потребления.

Ответ. $N = \ln 2 / \Delta \approx 30$ лет.

19.1. Дефект масс. Энергия связи.

19.1. Дефект масс. Энергия связи.

Наблюдается распад составного покоящегося тела массы M на осколки с массами m_j . Сохранение 0-й компоненты 4 – вектора энергии импульса:

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 = Mc^2 &= \sum_j \varepsilon_j = \sum_j (m_j c^2 + K_j), \quad \sum_j K_j > 0 \rightarrow \\ &\rightarrow M > \sum_j m_j.\end{aligned}$$

Df. Разность масс конечная минус начальная

$$\Delta m = \sum_j m_j - M, \quad \Delta m$$

называется дефектом массы.

В реакциях деления $\Delta m < 0$!

Энерговыделение реакции Q есть полная кинетическая энергия продуктов:

$$Q = \sum_j K_j = -\Delta m \cdot c^2.$$

Df. Энергия связи – минимальная работа необходимая для «разборки» исходного тела – удаления осколков:

$$\varepsilon_{св} = \Delta m c^2, \quad \varepsilon_{св} < 0.$$

Дефект масс – универсальная характеристика эффективности процессов «производства» энергии.

19.1.1. Физические принципы получения энергии.

А. Горение, сжигание топлив. $\Leftrightarrow$ Химические реакции.

Происходит перестройка электронных оболочек атомов в результате электромагнитного взаимодействия.

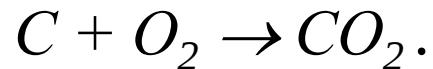
В. Ядерные реакции деления. Распад тяжелых атомных ядер на легкие. Выделение энергии в виде кинетической энергии осколков.

Процесс распада - результат сильного ядерного взаимодействия.

С. Ядерные реакции синтеза – термоядерные реакции. Слияние относительно легких ядер в тяжелое ядро. Выделение энергии в виде прироста кинетической энергии продуктов.

19.2. А. Энергия химических реакций.

Сжигание органического топлива в реакции:



Энерговыделение реакции

(тепловой эффект на моль вещества $Q/1$ моль)

$$Q = 4 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Оценка дефекта массы реакции

$$\Delta m = Q/c^2 = 4 \cdot 10^5 / (3 \cdot 10^8)^2 = 4,4 \cdot 10^{-12} \text{ кг}.$$

Относительный дефект массы (по сравнению с массой исходных веществ):

$$\Delta m / m \approx 10^{-9} = 10^{-7} \%.$$

19.3. В. Ядерная энергия – энергия деления тяжелых ядер.

Состав атомного ядра Z протонов (p) +
+ N нейтронов (n) .

Массовое число нуклонов A , $A = Z + N$ (A - всего $p+n$).

Энергия связи ядра с массовым числом A – энергия необходимая для «сборки» ядра из Z протонов (p) и N нейтронов (n) :

$$e = \Delta m \cdot c^2 = (Z m_p + N m_n - m_A) \cdot c^2 ,$$

Δm – дефект массы.

Df. Вводится энергия связи на один нуклон ($MэВ/A$):

$$e_1 = \Delta m \cdot c^2 / A \quad (MэВ/A) .$$

Эксперимент: $\max e_1 \approx 8,8$ ($MэВ/$ нуклон) – в ядре железа ^{56}Fe .

Экспериментальный факт: относительный дефект массы реакции деления ядер по порядку величины составляет $\sim 0,1\%$, что гораздо больше относительного дефекта массы химической реакции $10^{-7}\%$.

Энергия связи e_1 снижается в области тяжелых ядер ($_{92}U$, $_{94}Pu$, ...) и области легких ($_1H$, $_2He$, ...) (см. рис.).

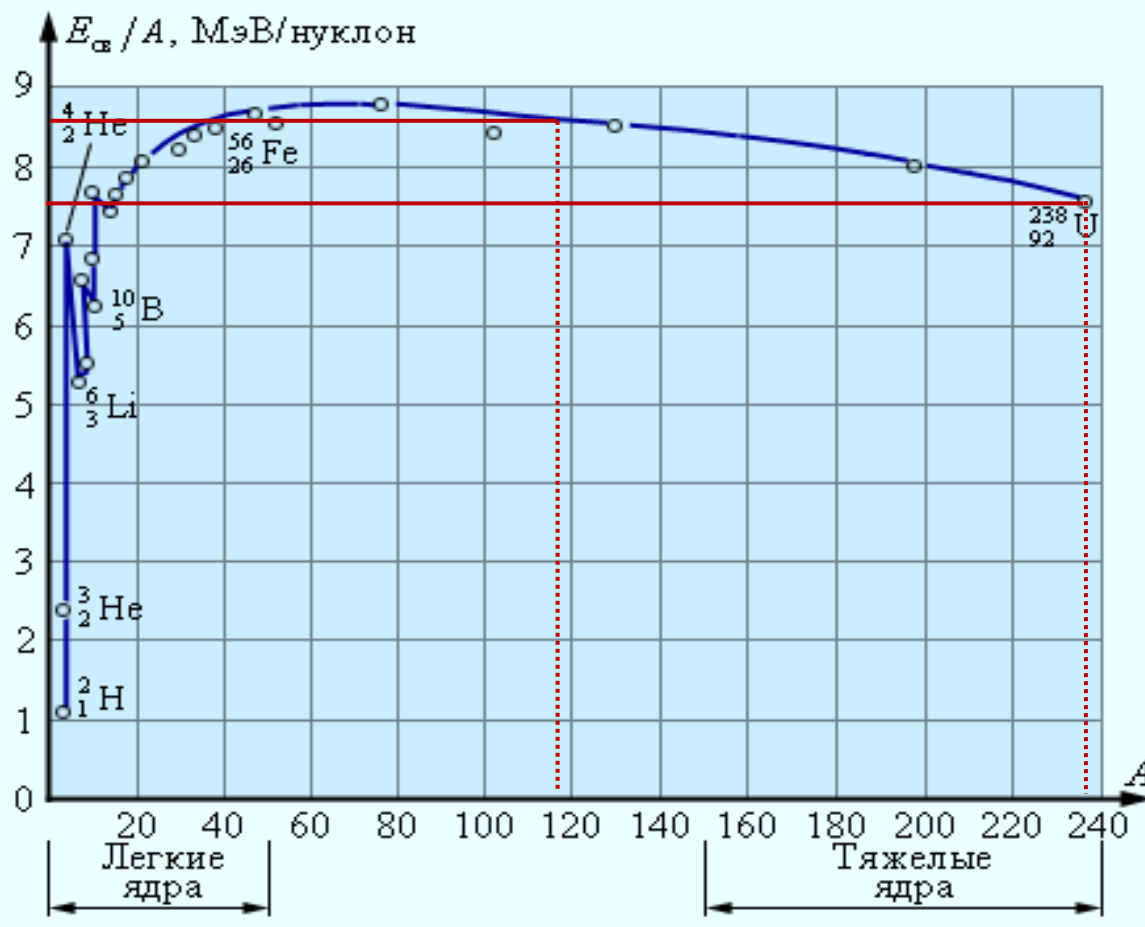


Рис. Удельная (на один нуклон) энергия связи ядер $E_{св}/A$ в зависимости от массового числа A .

Пример: Реакция деления урана на два ядра (олово) ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{119}\text{Sn} + {}^{119}\text{Sn}$.

$\varepsilon_{\text{Sn}} = 8,6$ МэВ/ нуклон, $\varepsilon_{\text{U}} = 7,5$ МэВ/ нуклон. Выделяется $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{Sn}} - \varepsilon_{\text{U}} = 0,9$ МэВ / нуклон.

При распаде одного ядра ${}^{238}_{92}\text{U}$ ($A = 238$) выделяется $E_1 = A \cdot \Delta\varepsilon \approx 200$ МэВ $= 3,2 \cdot 10^{-11}$ Дж.

При распаде одного моля ядер урана выделится $N_A E_1 \approx 2 \cdot 10^{13}$ Дж!

Технически наиболее широко осуществляется «урановый процесс».

Наиболее вероятная реакция деления:



Энерговыделение $Q \approx 200 \text{ МэВ}$.

Относительный дефект массы:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{Q}{(m_U + m_n)c^2} \approx 0,1\% \gg \left(\frac{\Delta m}{m}\right)_{\text{Хим}}$$

Необходимым условием осуществления управляемой! реакции является замедление вторичных нейтронов до «тепловых» энергий $K_n \sim 0,025 \text{ эВ}$.



Рис. Схема АЭС

19.4. С. Термоядерная энергия.

Энергия реакций синтеза легких ядер.

Nb. Масса любого стабильного ядра меньше суммы масс составляющих протонов и нейтронов.

$$m_A < Z m_p + N m_n.$$

Дефект массы в синтезе – источник большого выделения энергии.

Обозначения: дейтерий (d) ${}^{A=2}_{Z=1}H = {}^2_1H = {}^2d$; ($Z = 1, A = 2$) ;

тритий (t) ${}^{A=3}_{Z=1}H = {}^3_1H = {}^3t$; ($Z = 1, A = 3$) .

Примеры реакций синтеза с участием 2d , 3t .

Реакция синтеза	Энерговыведение, Q (МэВ)
${}^2d + {}^2d \rightarrow {}^3t + {}^1_1H$	4,03
${}^2d + {}^2d \rightarrow {}^3_2He + n$	3,27
${}^2d + {}^3t \rightarrow {}^4_2He + n$	17,59 (!)
${}^3t + {}^3t \rightarrow {}^4_2He + 2 n$	11,33

(!) Относительный дефект массы реакции может достигать ($Q = 17,6$ МэВ):

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{Q}{(m_d + m_t) \cdot c^2} \approx 0,4 \%$$

19.4.1. Проблемы реализации термоядерной реакции.

1. Нагрев вещества с целью преодоления кулоновских сил отталкивания для включения сильного ядерного взаимодействия.
2. Высокая плотность исходных продуктов - дейтерия и трития с целью повышения вероятности двух частичных столкновений
3. Удержание нагретой, высокотемпературной плотной плазмы в ограниченном объеме, исключение контакта со стенками камеры.

Критерий Лоусона (1957): выход энергии в термоядерном реакторе превышает энергетические затраты на поддержание реакции при условии:

$$n \cdot \tau > \sim 3 \cdot 10^{14} \text{ г} / \text{см}^3.$$

n — плотность ионов плазмы, τ - время удержания.

19.4.2. Экспериментальные установки.

«ТОКАМАК» **Т**Ороидальная **К**Амера с **М**Агнитной **К**атушкой.

Идея Сахаров, Тамм (1951). Термин - Головин, Явлинский.

Тороидальный плазменный токовый шнур удерживается от контакта со стенками тороидальной камеры мощными магнитными полями, созданными обмотками, намотанными по внешней поверхности камеры.

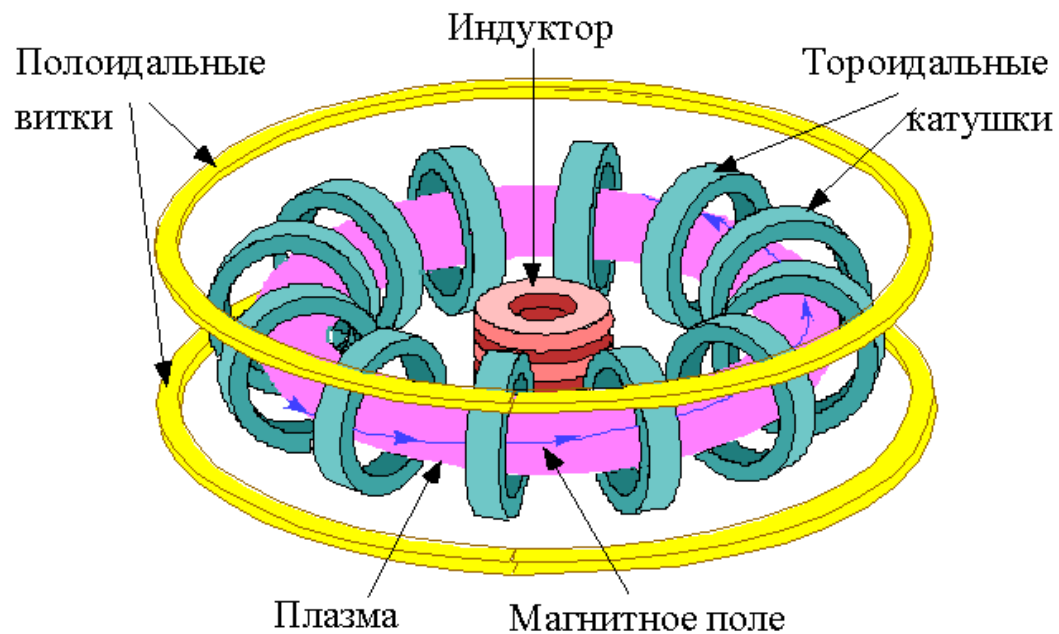


Рис. Схема установки ТОКАМАК.

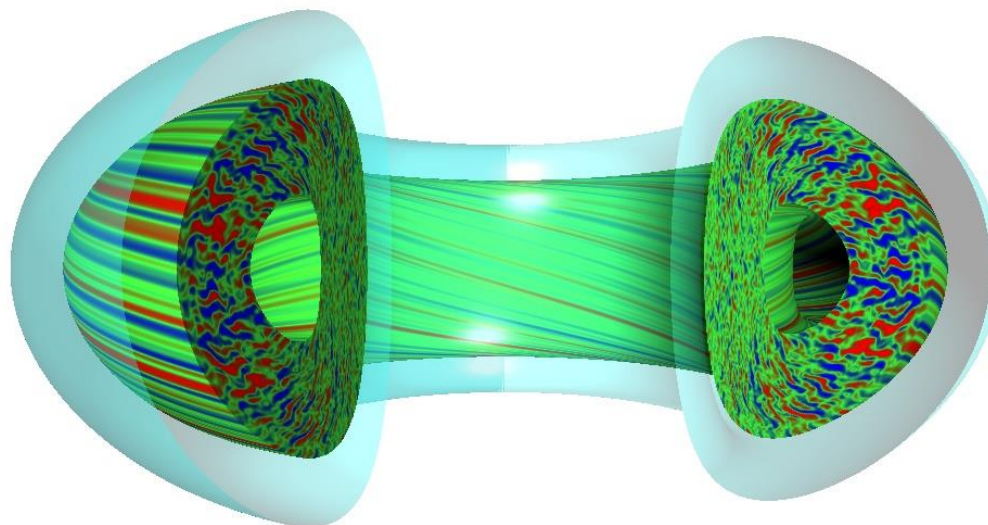
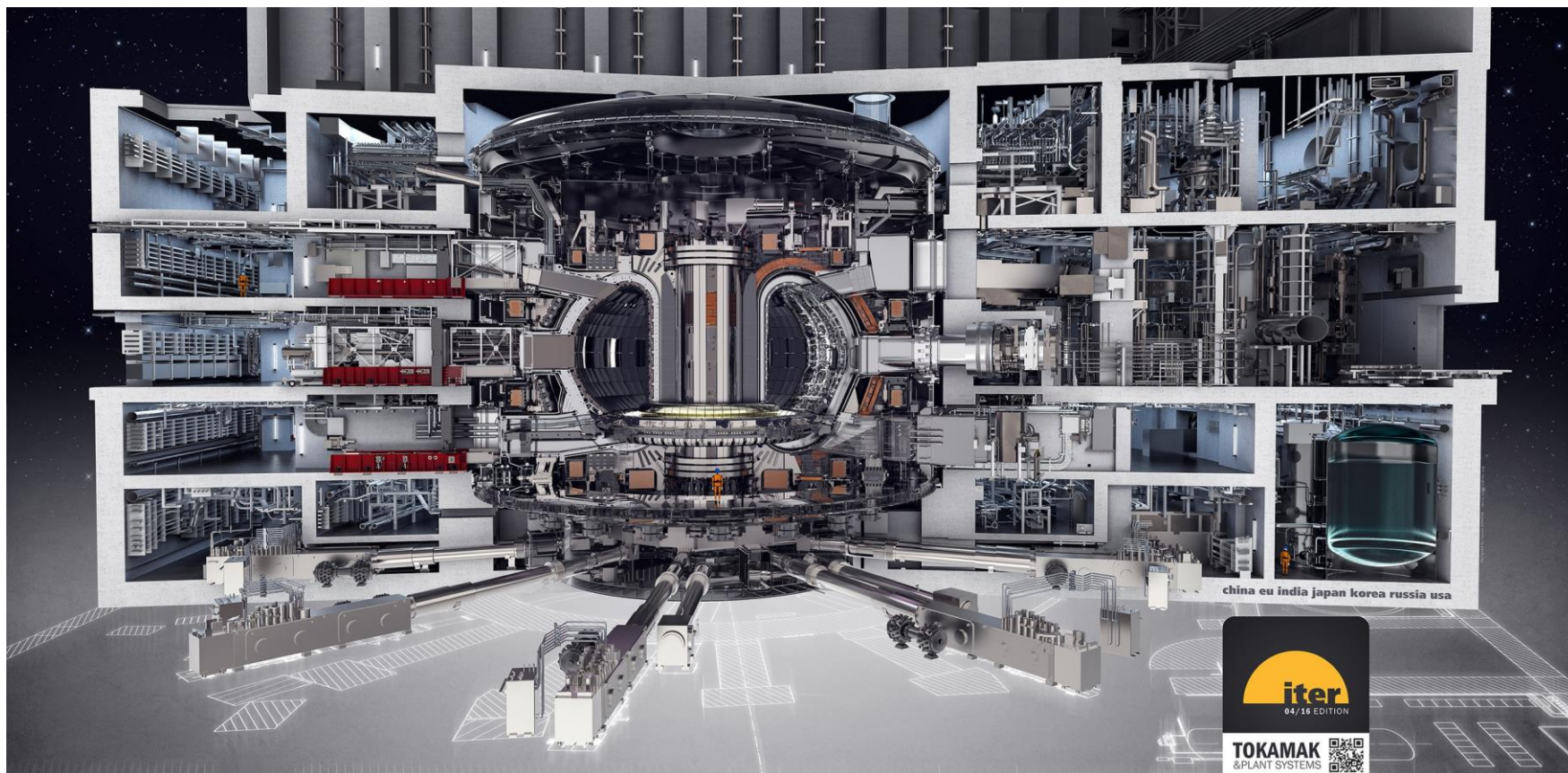


Рис. Модель движения плазмы в ТОКАМАКе

19.4.3. Исследовательский реактор ИТЭР.



Реакция синтеза: $n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$

Общий радиус конструкции	10,7 м	Высота	30 м
Большой радиус вакуумной камеры	6,2 м	Малый радиус вакуумной камеры	2,0 м
Объём плазмы	837 м³	Магнитное поле	5,3 Тл
Максимальный ток в плазменном шнуре	$15 \cdot 10^6$ А	Мощность внешнего нагрева плазмы	$73 \cdot 10^9$ Вт
Средняя термоядерная мощность в один импульс	$500 \cdot 10^9$ Вт	Пиковая термоядерная мощность в импульсе	$1100 \cdot 10^9$ Вт
Коэффициент усиления мощности	10	Средняя температура	$100 \cdot 10^9$ °К
Продолжительность импульса	> 400 с	Стоимость проекта	15 млрд евро

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

<http://phys.nsu.ru/fit>

<http://el.nsu.ru>