



# Ядерная физика и Человек

# ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

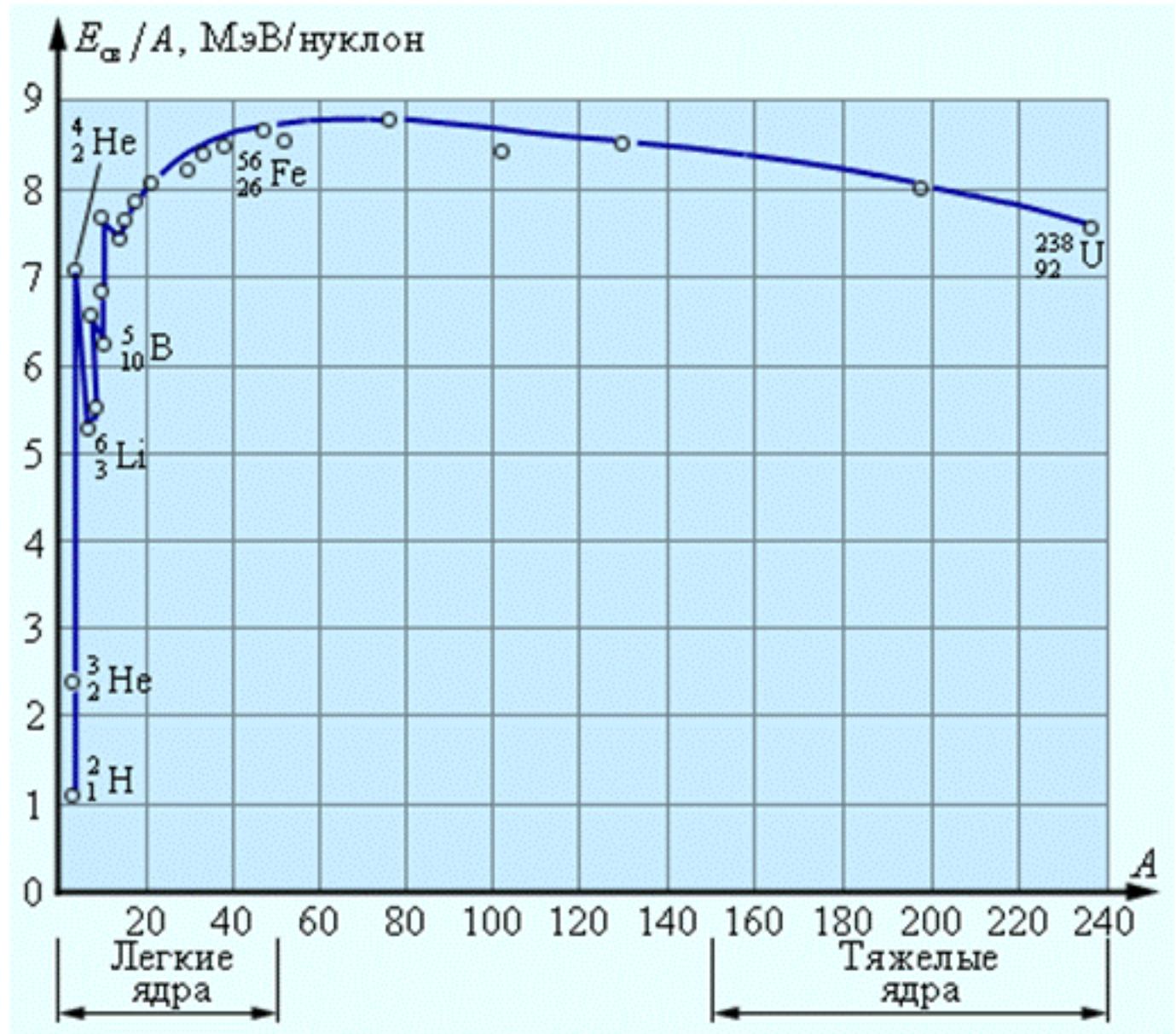
# Энергия связи ядра $W(A,Z)$

**Энергия связи ядра  $W(A,Z)$  –**  
минимальная энергия, которую  
необходимо затратить для того, чтобы  
разделить атомное ядро на отдельные  
составляющие его нейтроны и протоны.

$$\begin{aligned} M(A,Z)c^2 + W(A,Z) &= \\ &= Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 \end{aligned}$$

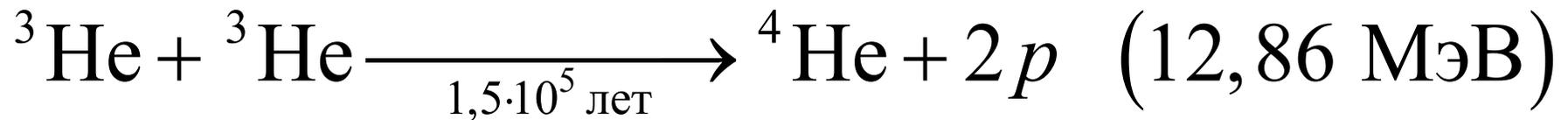
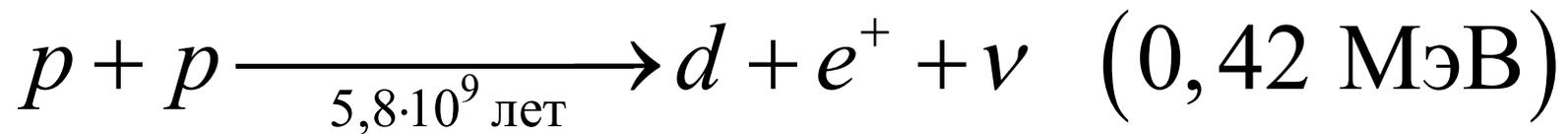
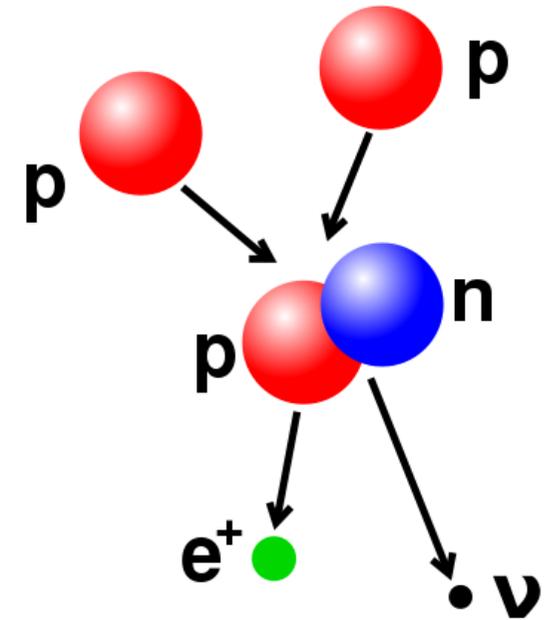
# Удельная энергия связи ядра

$$\varepsilon = W / A$$

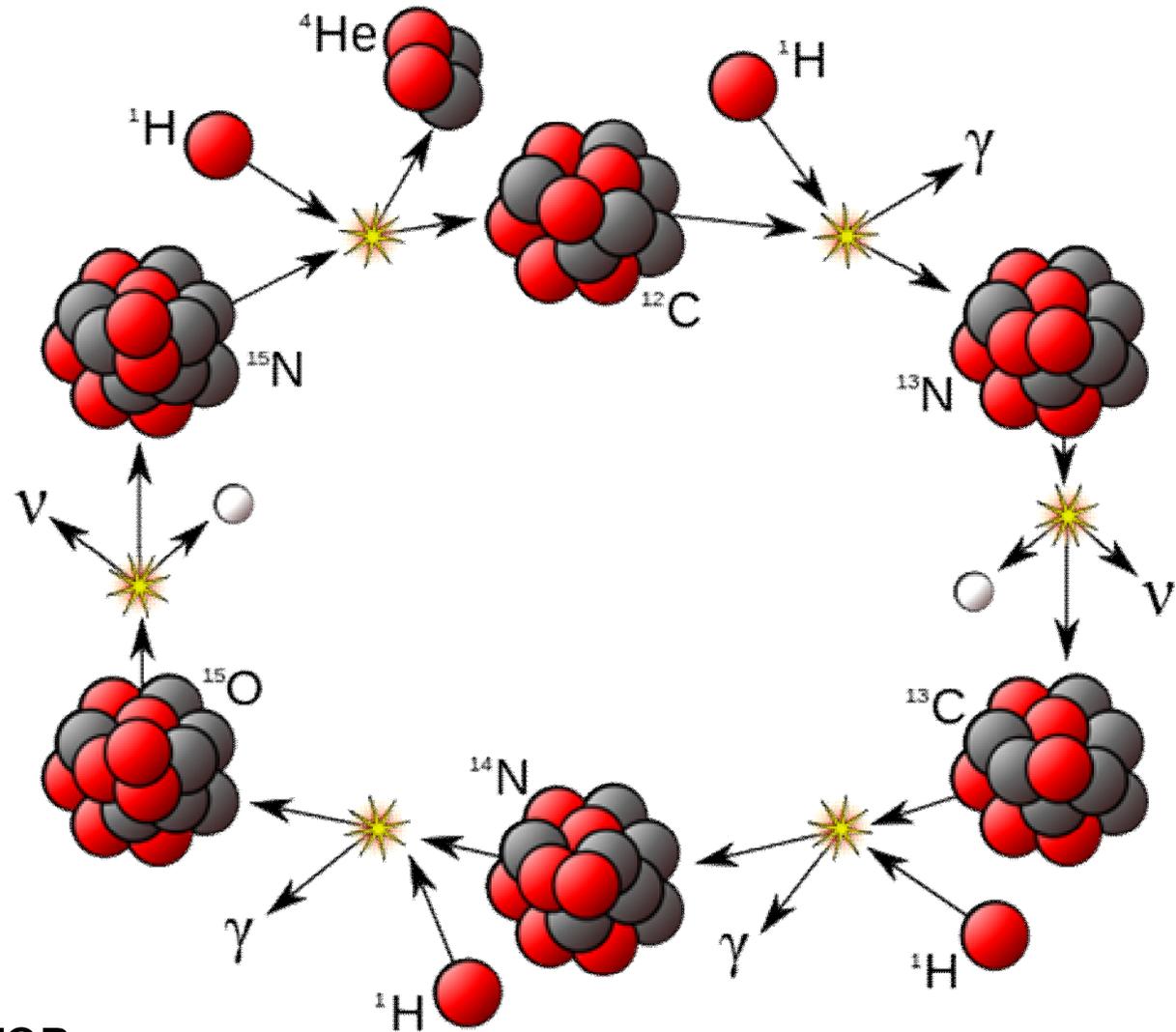


# Горение водорода в звездах

Цепочка наиболее вероятных реакций начинается с реакции, идущей по слабому взаимодействию



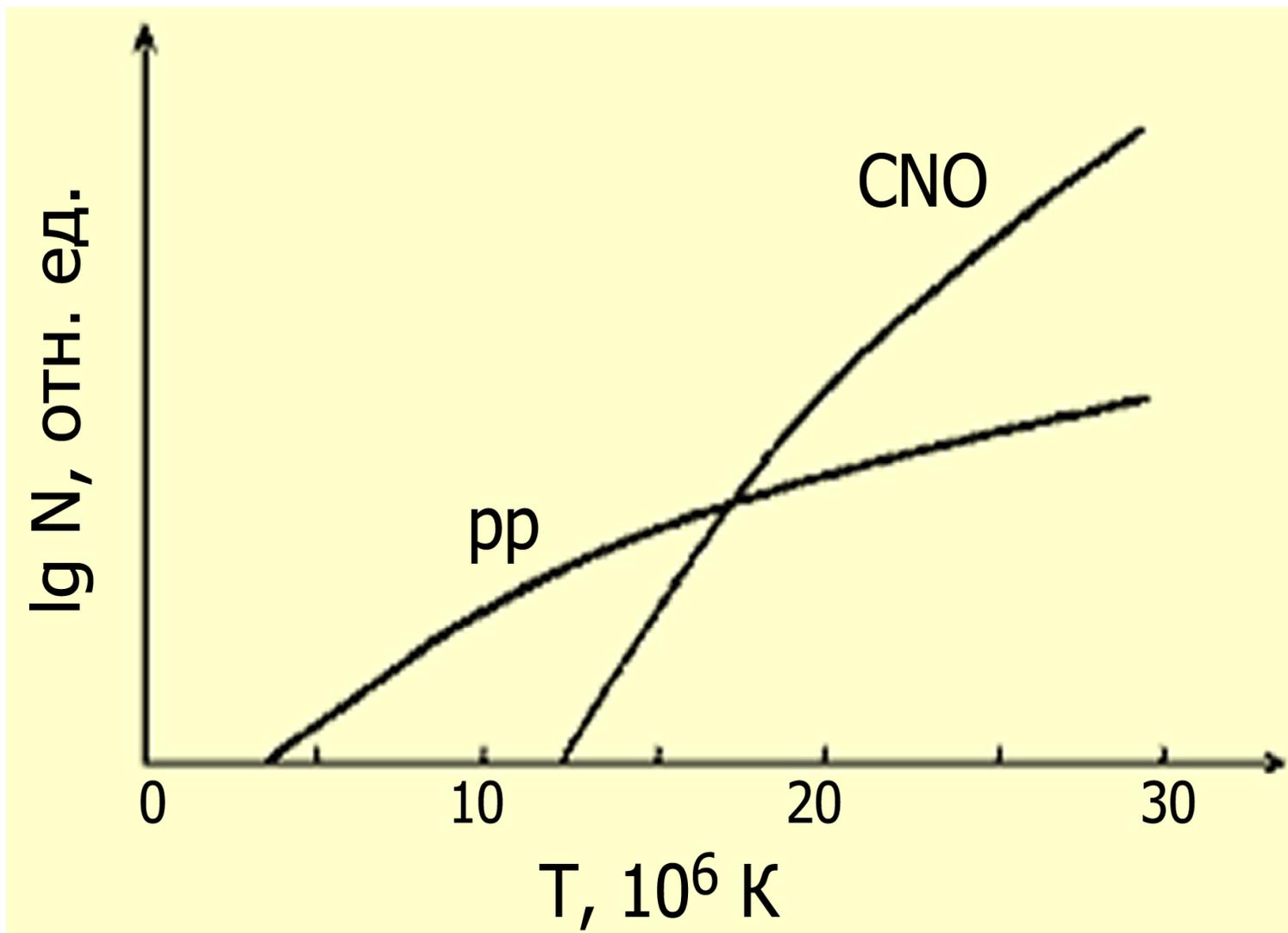
# СНО ЦИКЛ



Один из вариантов  
СНО цикла.

	Proton	$\gamma$	Gamma Ray
	Neutron	$\nu$	Neutrino
	Positron		

# PP и CNO-циклы



Температура в недрах Солнца  $\sim 13 \cdot 10^6$  К, поэтому оно светит в основном за счет энергии, выделяющейся в водородном цикле.

# Горение водорода в звездах

Суммарная реакция



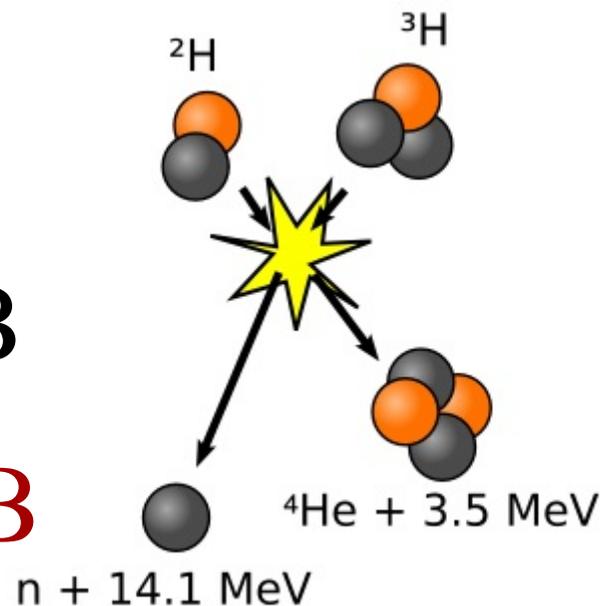
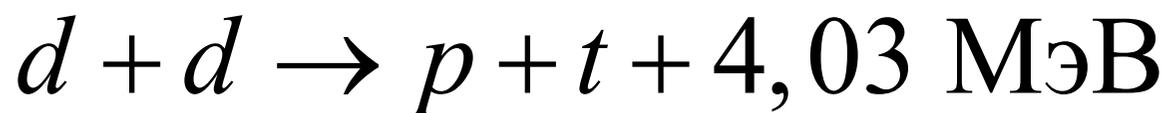
Энерговыделение дополняется аннигиляцией двух позитронов

$$Q = 24,68 \text{ МэВ} + 4m_e c^2 = 26,72 \text{ МэВ}$$

## Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

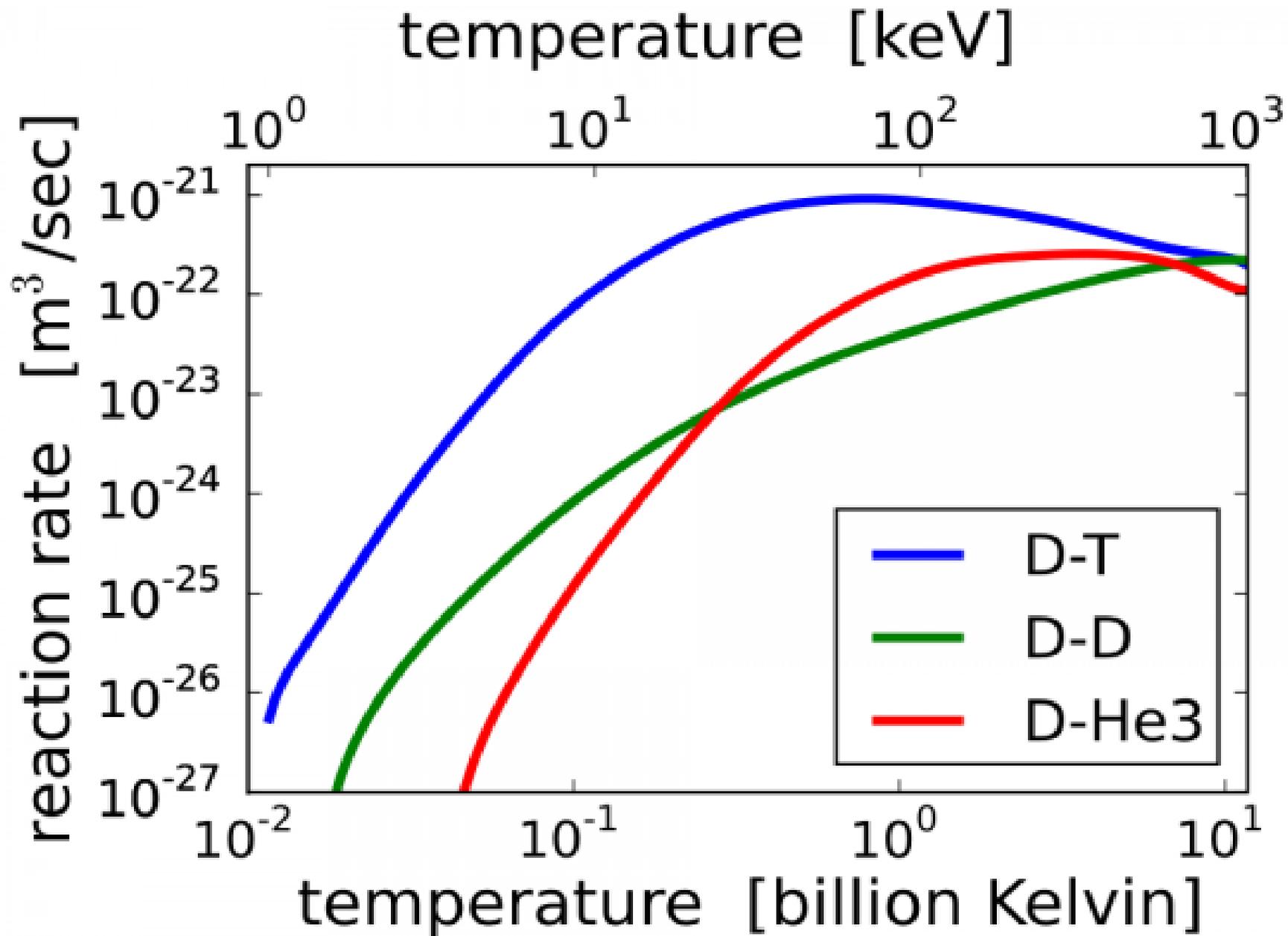
Масса, $M_{\odot}$	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

# Термоядерные реакции для управляемого термоядерного синтеза



Все эти реакции идут по сильному взаимодействию.

# Скорость термоядерных реакций



# Критерий Лоусона

Критерий Лоусона определяет минимальную частоту реакций синтеза в секунду, необходимую для устойчивого поддержания реакции.

Для реакции

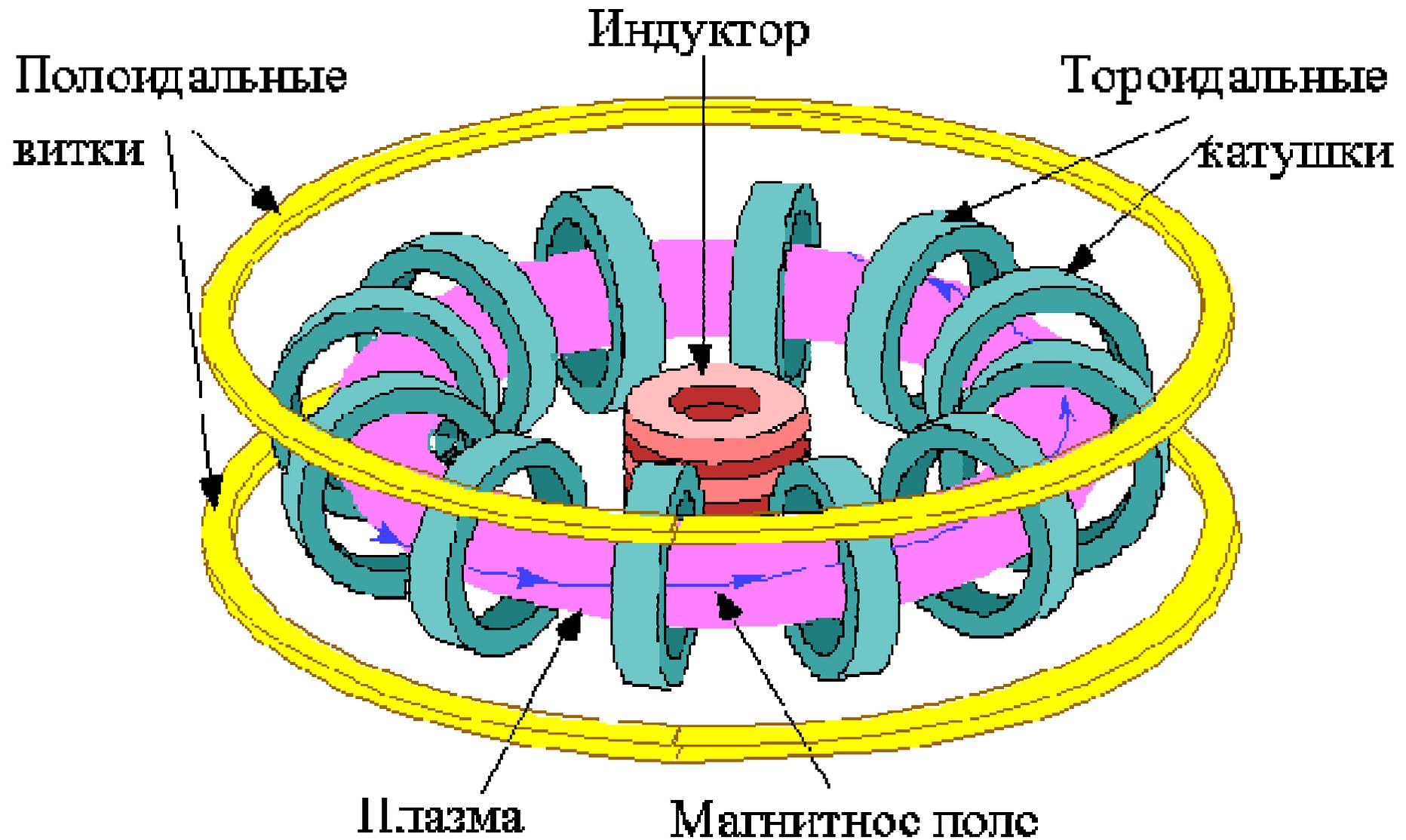


$$n \cdot \tau > 10^{14} \text{ с/см}^3$$

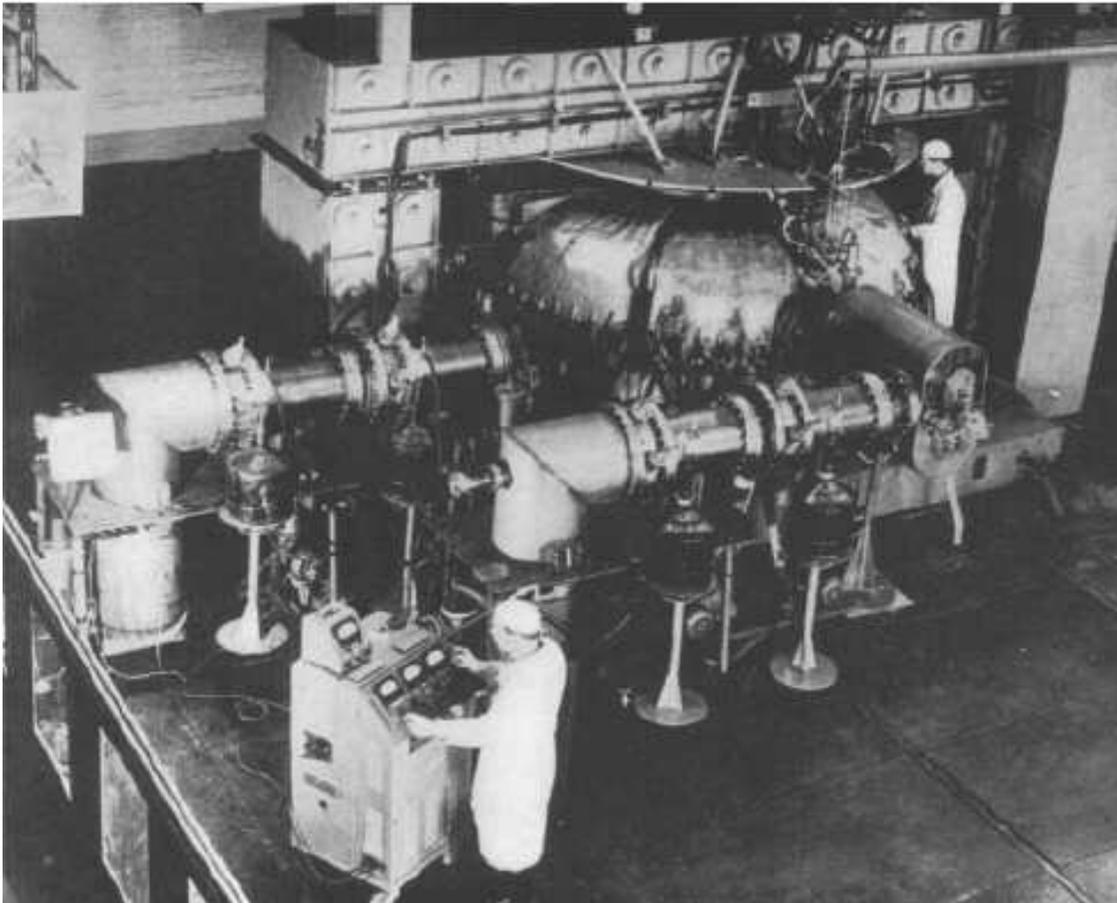
где  $n$  — плотность плазмы,  $\tau$  — время удержания плазмы

При выполнении критерия Лоусона энергия, выделяющаяся при управляемом термоядерном синтезе, превышает энергию, вводимую в систему.

# Токамак



# Эволюция токамаков

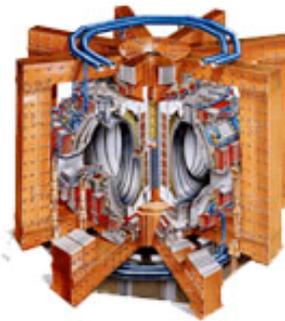


Токамак Т-3 (СССР)

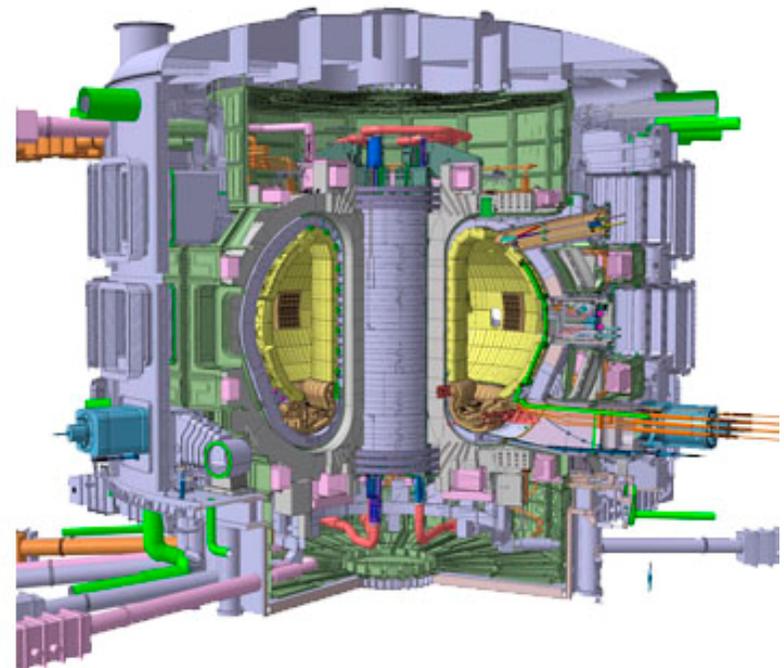
Т-3



JET

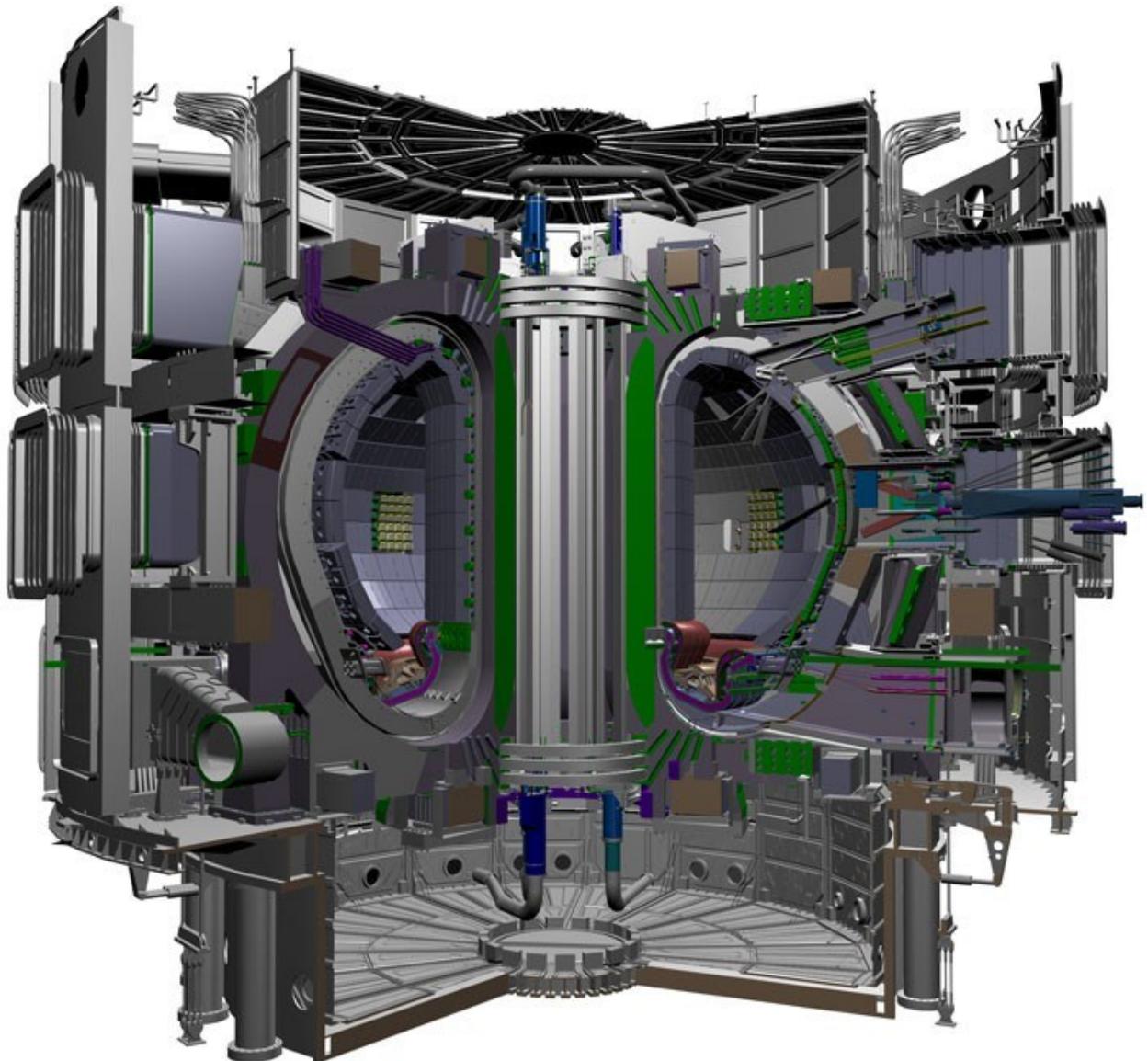


ITER

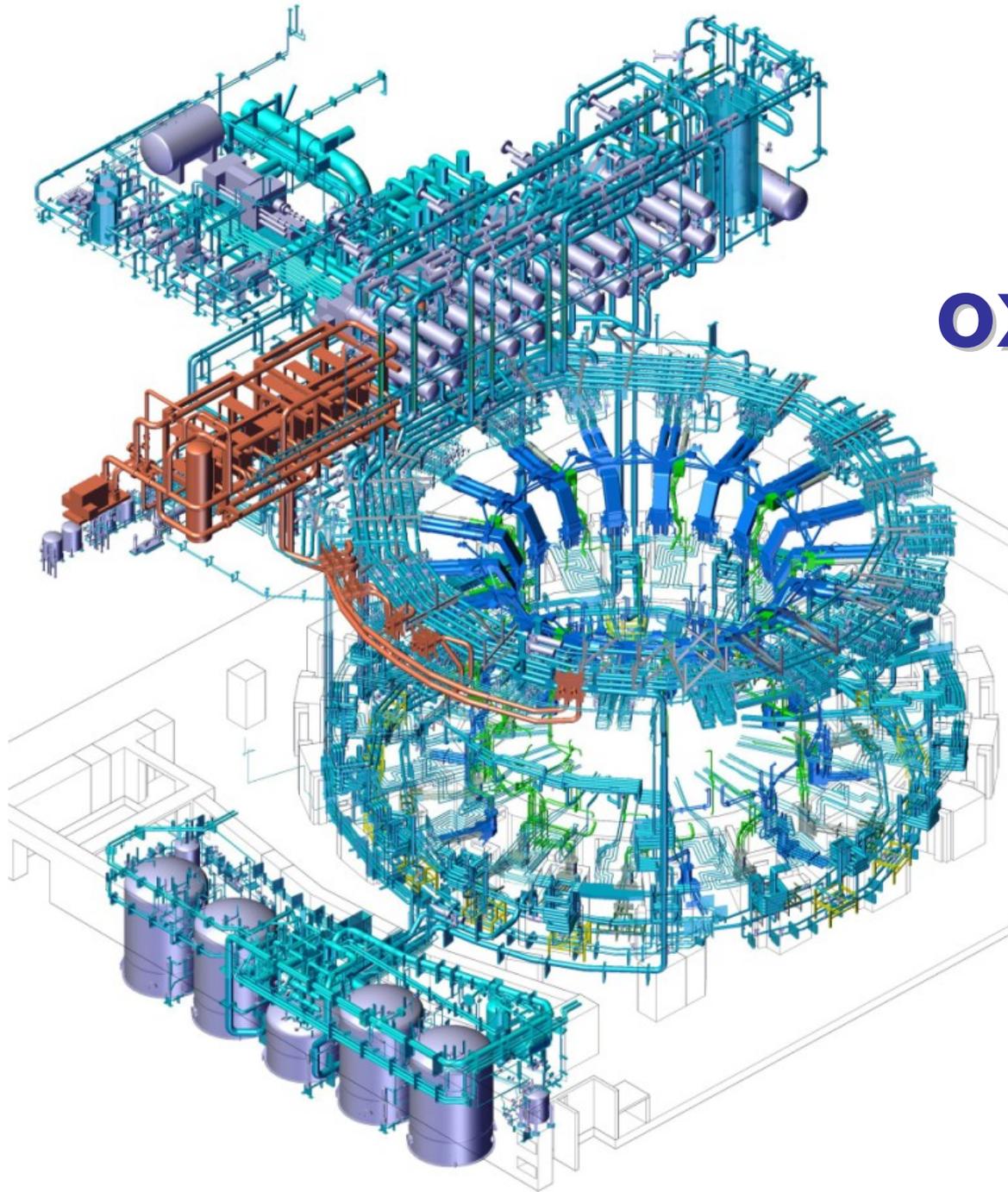


# Проект ITER

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 м <sup>3</sup>
Магнитное поле	5,3 Тл
Максимальная сила тока в плазменном шнуре	15 МА
Мощность внешнего нагрева плазмы	73 МВт
Средняя термоядерная мощность за один импульс	500 МВт
Пиковая термоядерная мощность в импульсе	1100 МВт
Коэффициент усиления мощности	10
Средняя температура	100 МК
Продолжительность импульса	> 400 с



# Система водяного охлаждения ITER

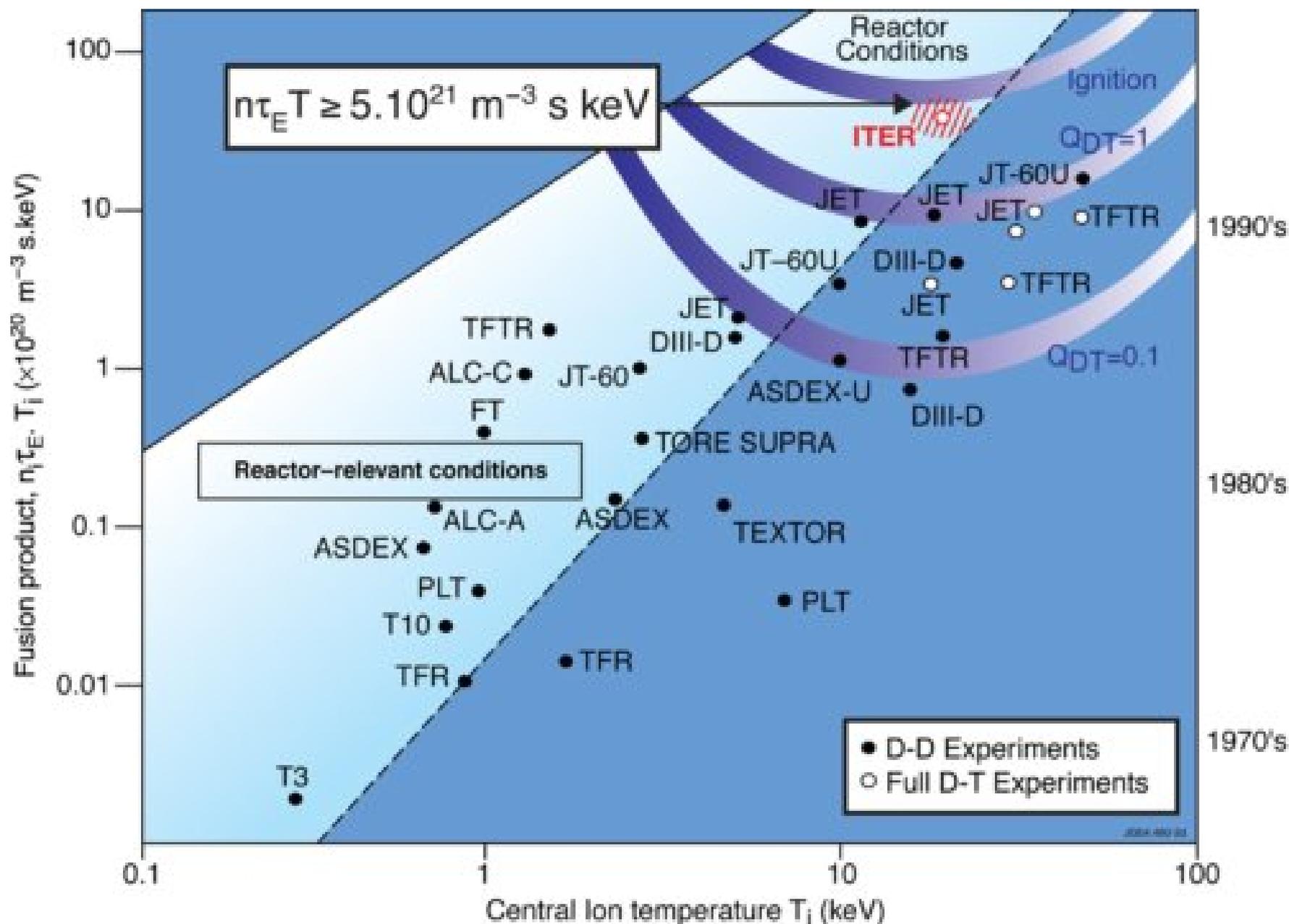


Проект очень  
сложен в  
техническом  
исполнении

# ITER строится



# Развитие токамаков



# ITER is the Next Step Toward a Solution based on Tokamaks



**Tore Supra**

$25 \text{ m}^3$

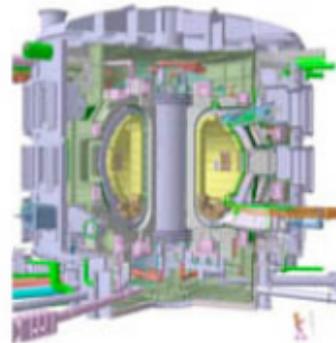
$\sim 0 \text{ MW}_{th}$



**JET**

$80 \text{ m}^3$

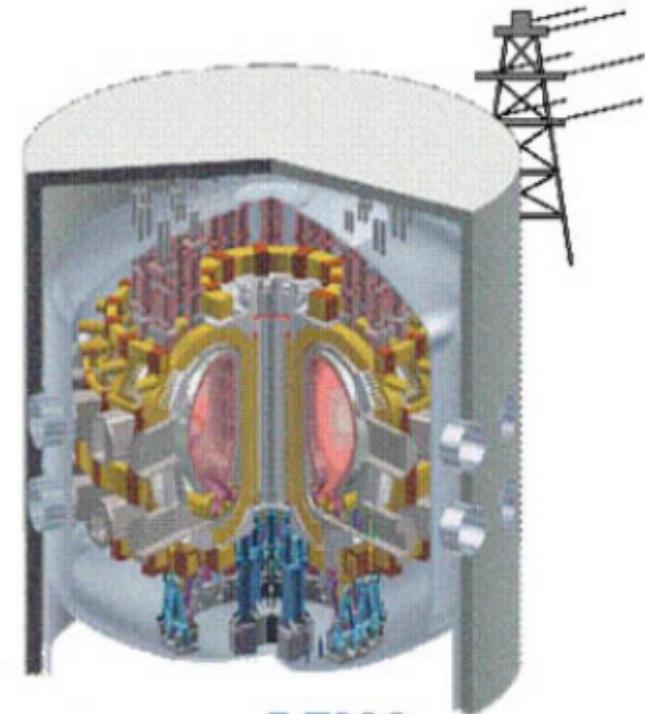
$\sim 16 \text{ MW}_{th}$



**ITER**

$800 \text{ m}^3$

$\sim 500 \text{ MW}_{th}$



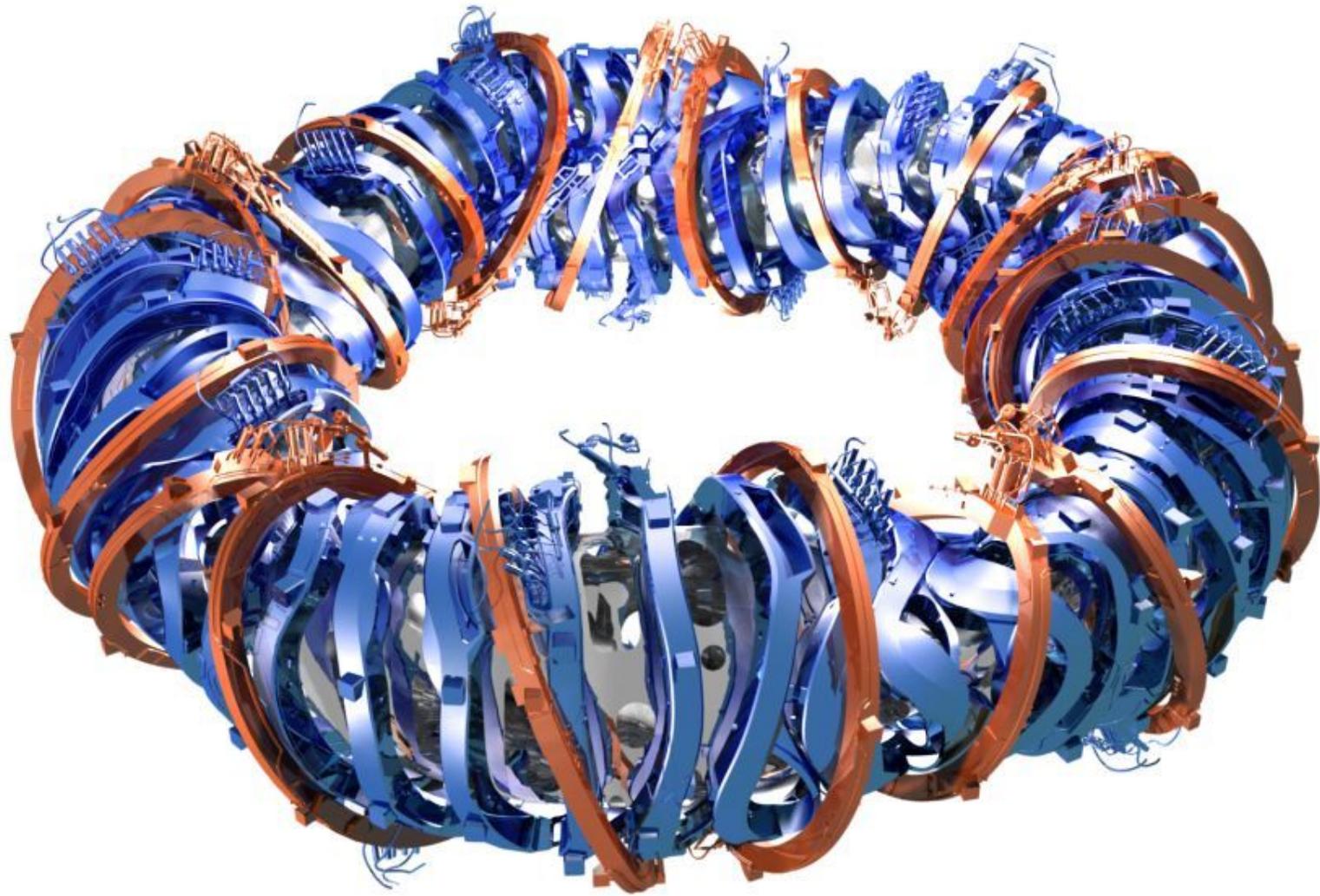
**DEMO**

$\sim 1000 - 3500 \text{ m}^3$

$\sim 2000 - 4000 \text{ MW}_{th}$

*- Dominant self heating ----->*

# Стелларатор



# Wendelstein 7-X

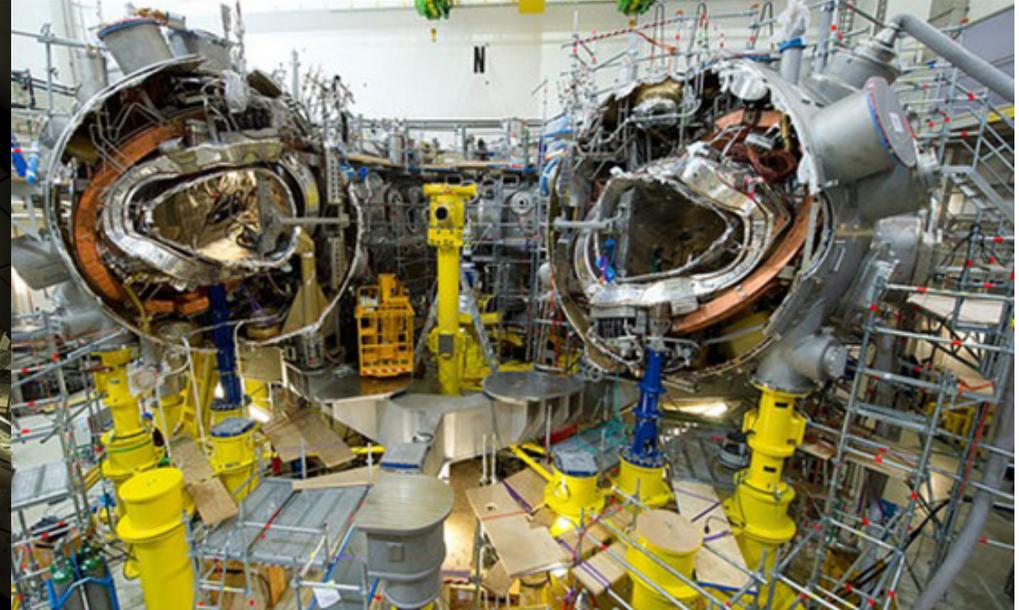
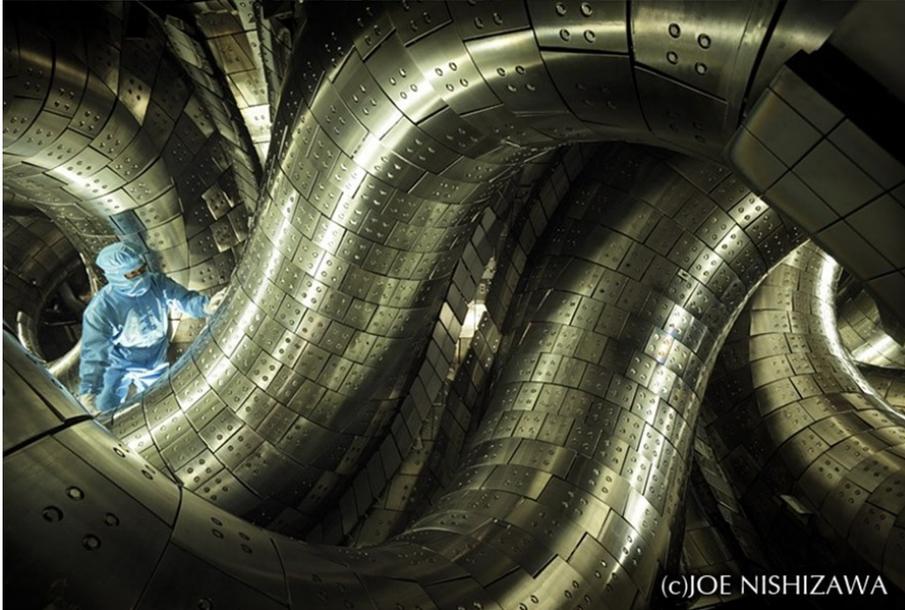
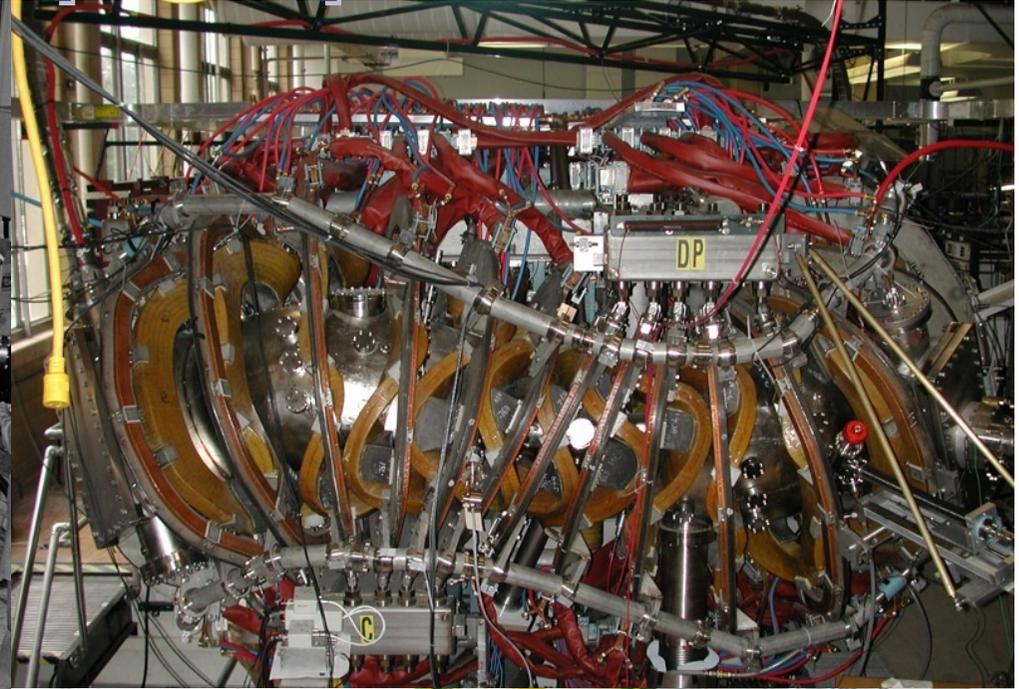
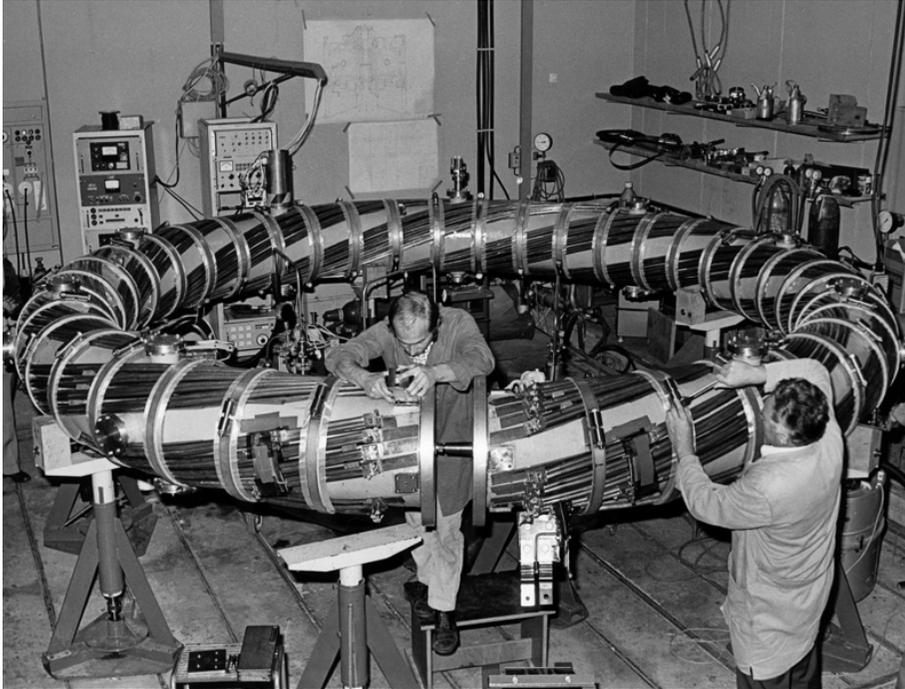
## Германия

Большой радиус плазмы	5,5 м
Малый радиус плазмы	0,53 м
Магнитная индукция	3—6 Тл
Длительность запусков	До 30 мин. постоянной работы
Мощность нагрева плазмы	14—20 МВт
Объём плазмы	30 м <sup>3</sup>
Количество плазмы	5—30 мг
Температура плазмы	60—130 млн К

# Стелларатор

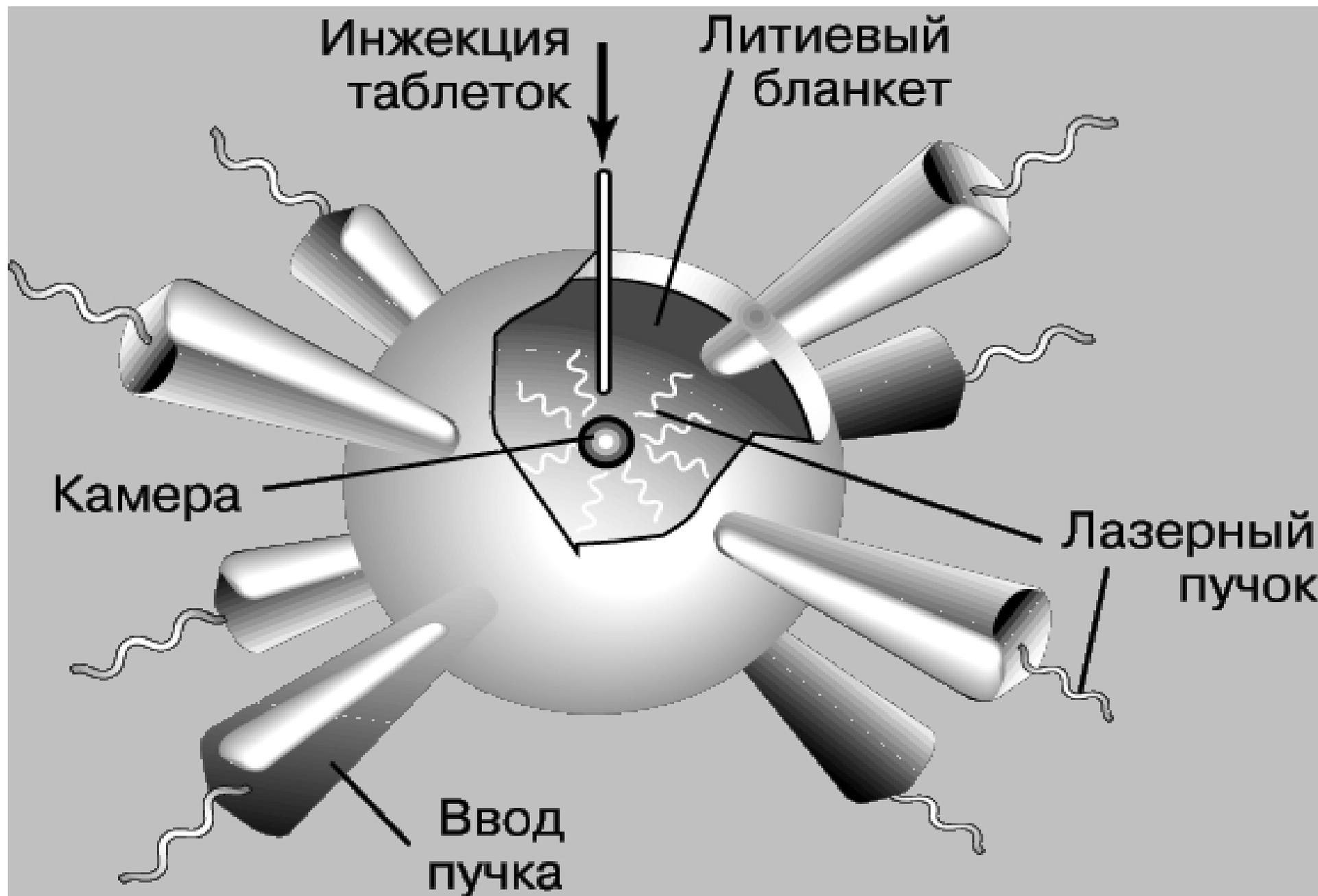


# Стеллараторы

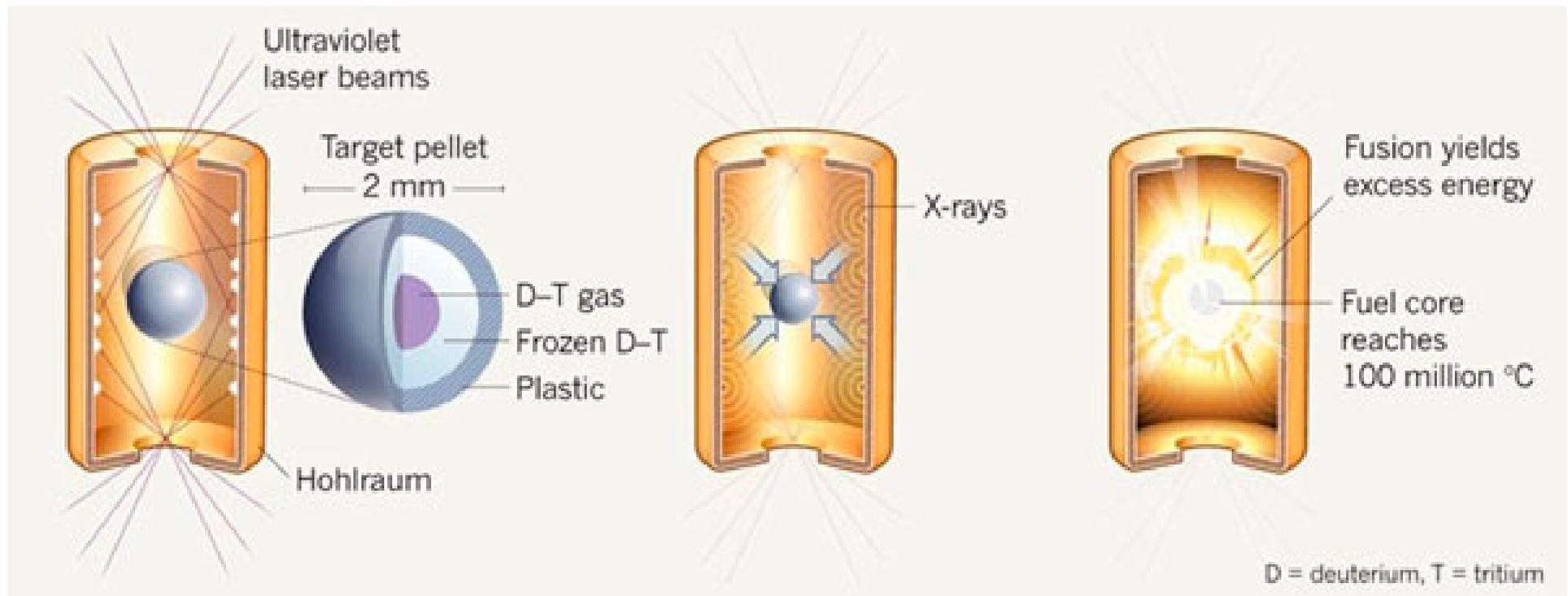


(c)JOE NISHIZAWA

# Инерциальный термоядерный синтез

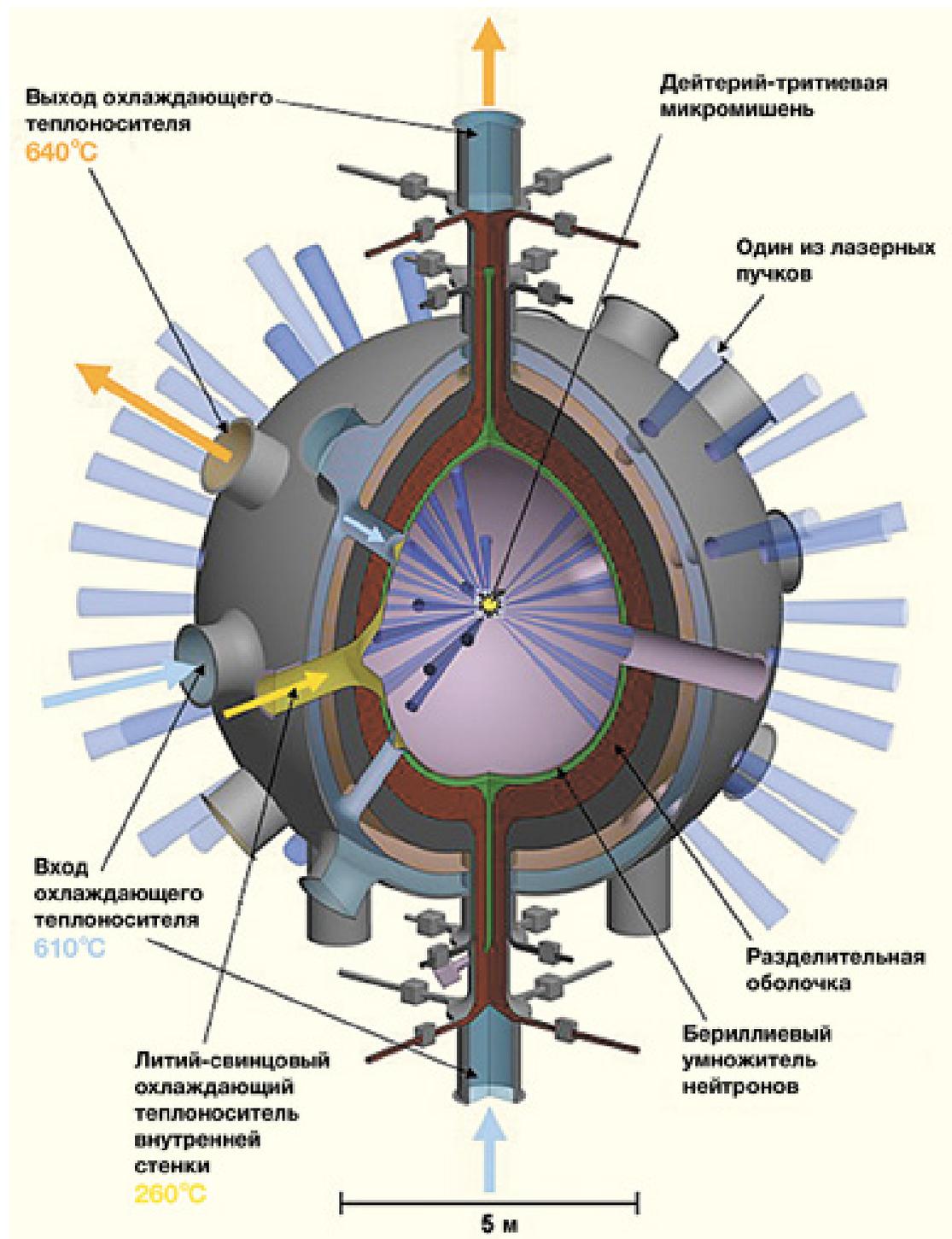


# Инерциальный термоядерный синтез

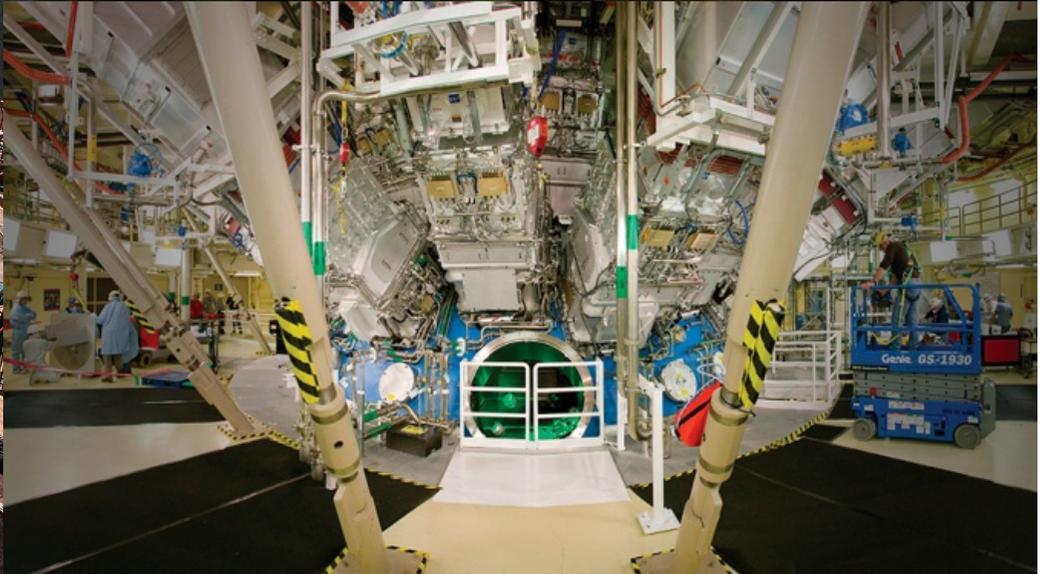
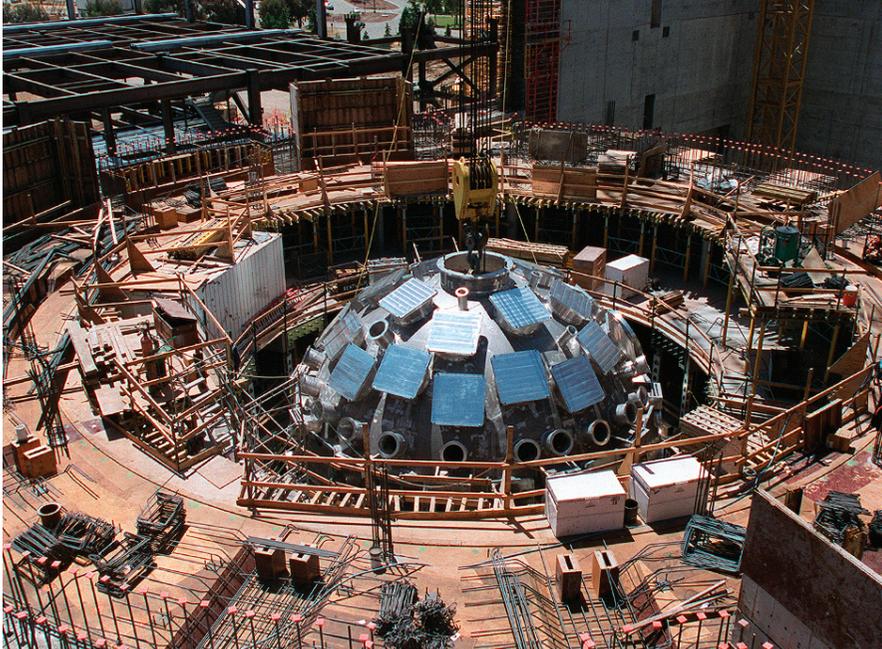
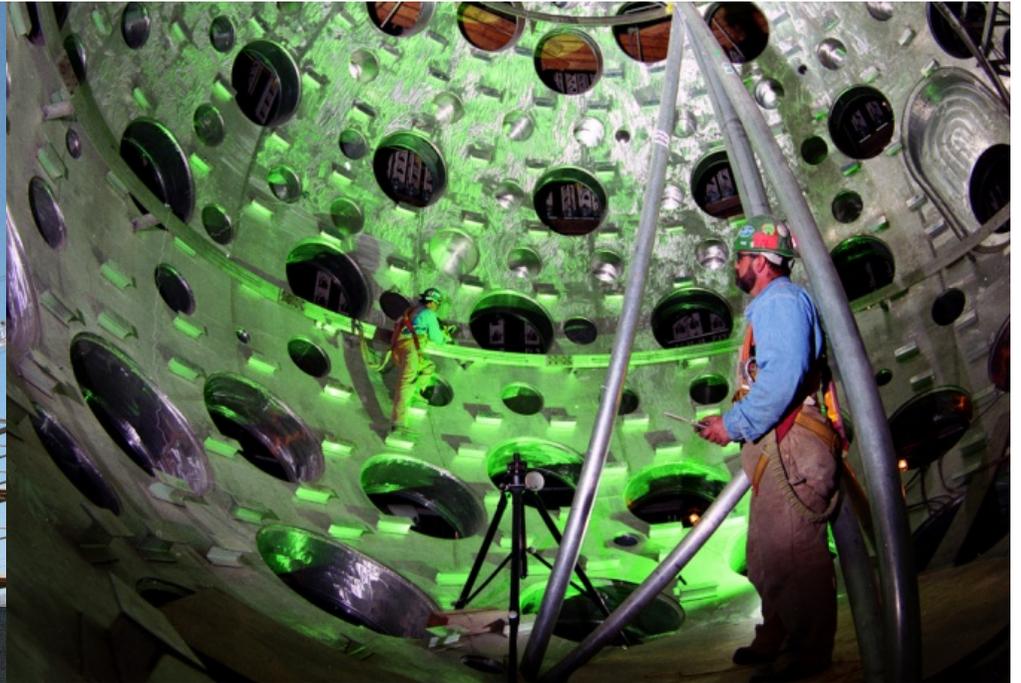


Свет нагревает контейнер— он разогревается и, излучая, равномерно рентгеновским излучением «обжимает» капсулу с термоядерным топливом.

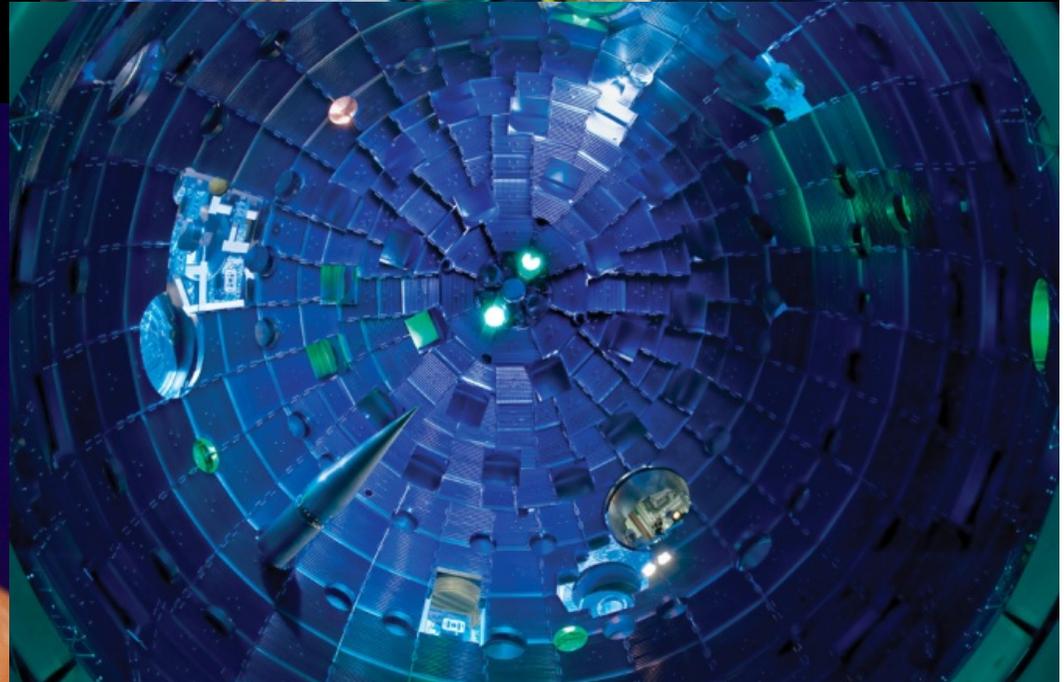
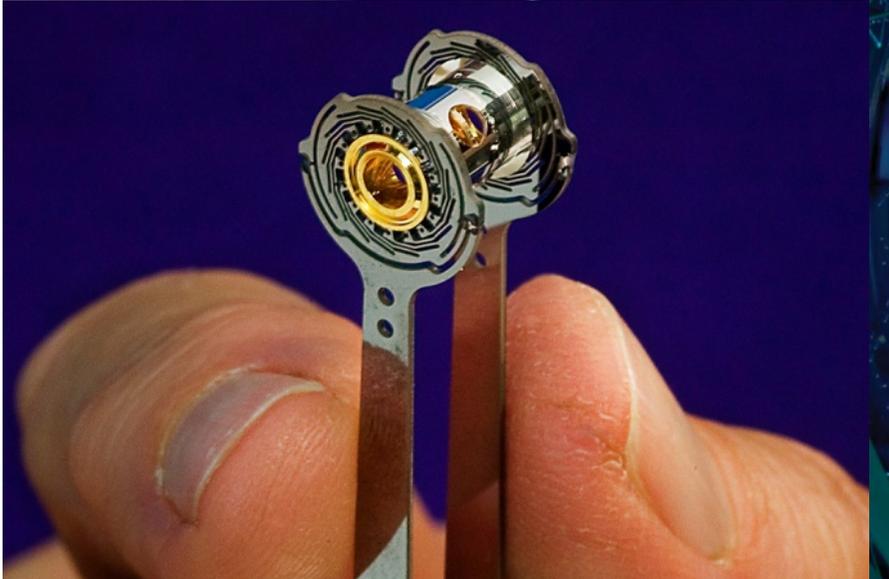
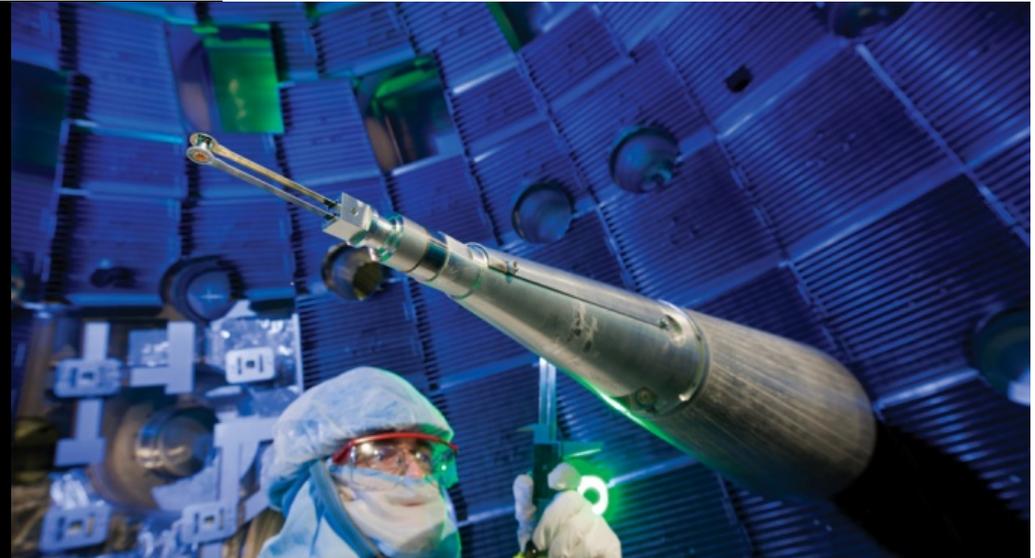
# National Ignition Facility Facility (Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций) Ливерморская национальная лаборатория, США



# National Ignition Facility



# National Ignition Facility



# National Ignition Facility

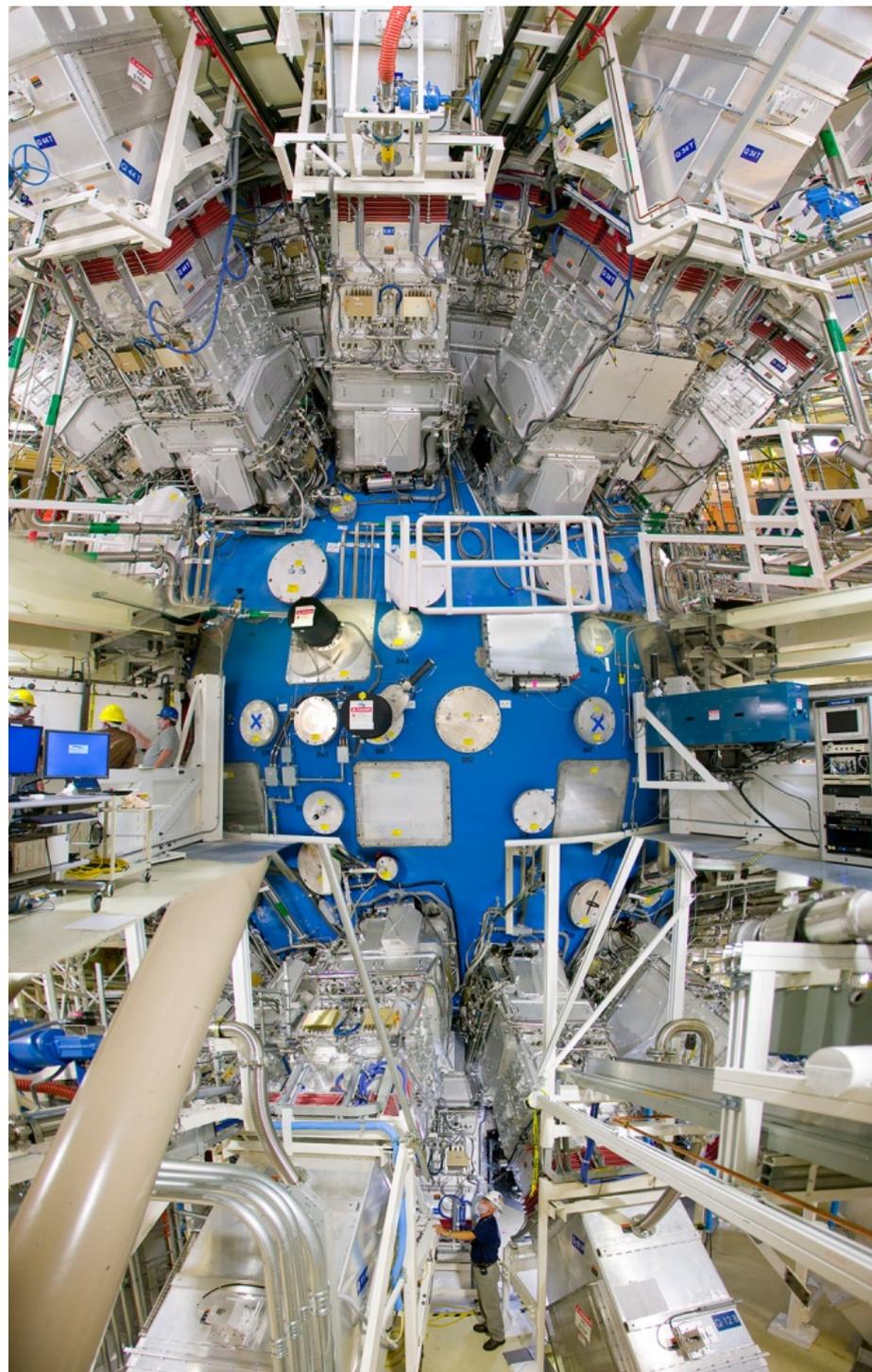
192 импульсных лазера

Мощность лазерной установки — 500 ТВт

Энергия импульса — 1,8 МДж

27 сентября 2013 г. в NIF впервые получен энергетический выход, превышающий поглощенную мишенью энергию.

Параметры полученной плазмы:  
плотность  $50 \text{ г/см}^3$   
давление до 100 млрд атмосфер  
температура до 60 млн градусов



# Мюонный катализ

## термоядерного синтеза

**Мюон** ( $\mu^-$ ) — это нестабильная элементарная частица (лептон), имеющая такой же заряд, как и электрон, но в 207 раз большую массу. Среднее время жизни мюона  $\tau = 2,2$  мкс.

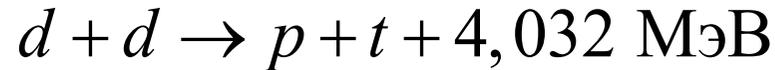
Мюон может замещать электрон в атоме водорода, при этом размер атома **уменьшается в 207 раз**, что позволяет одному ядру водорода приближаться к другому, не затрачивая на это энергию.

Сближение ядер в мезомолекуле эквивалентно нагреву водородной плазмы до **температуры ~ 30 млн. градусов**, что соответствует условиям центральной части многих звезд.

# Мюонный катализ термоядерного синтеза



# Мюонный катализ термоядерного синтеза



Реакции идут за счет сильного взаимодействия за время  $\tau = 10^{-9} - 10^{-12}$  с. Мюон успевает только около 100 раз поучаствовать в реакциях из-за 1%-ой убыли в каждом цикле за счет «прилипания» к гелию.

На получение мюона затрачивается энергия  $\sim 5 - 10$  ГэВ, то есть мюонный катализ пока энергетически невыгодный процесс. Выгодное производство энергии возможно при осуществлении более, чем 1000 циклов катализа на один мюон.

**Спасибо за  
внимание!**