



*Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»*

*Институт ядерной физики и технологий*

*Лаборатория экспериментальной ядерной физики  
<http://enpl.mephi.ru/>*

*А.И. Болоздыня*

# **Введение в ядерную физику**

***Лекция №7***

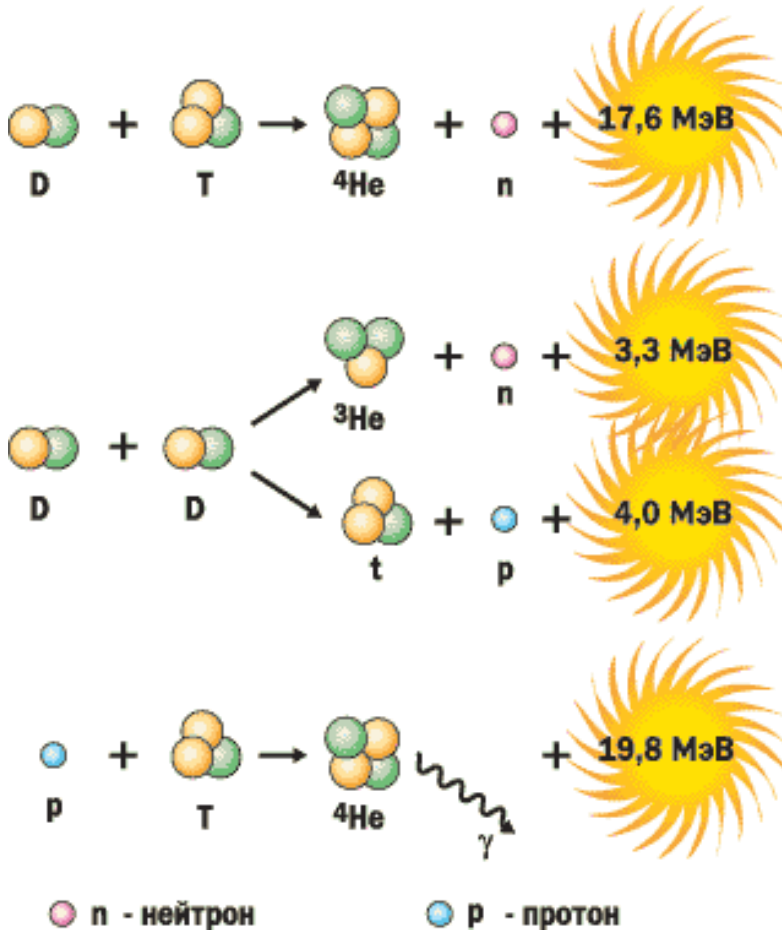
***Термоядерные реакции***

## *Лекция №7*

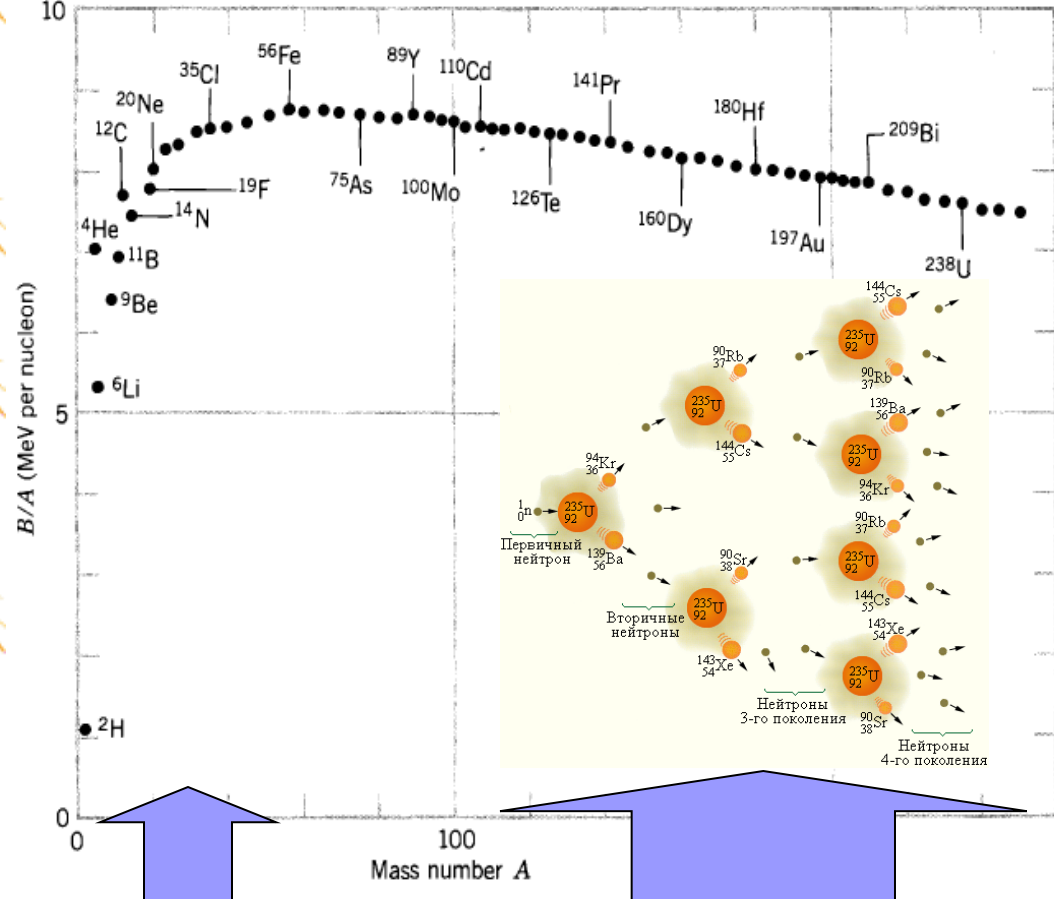
### *Термоядерные реакции*

- 1. Условия возможности синтеза ядер**
- 2. Термоядерные реакции в звёздах**
- 3. Термоядерное оружие**
- 4. Управляемые термоядерные реакции**

# 1. Условия возможности синтеза ядер (термоядерных реакций)

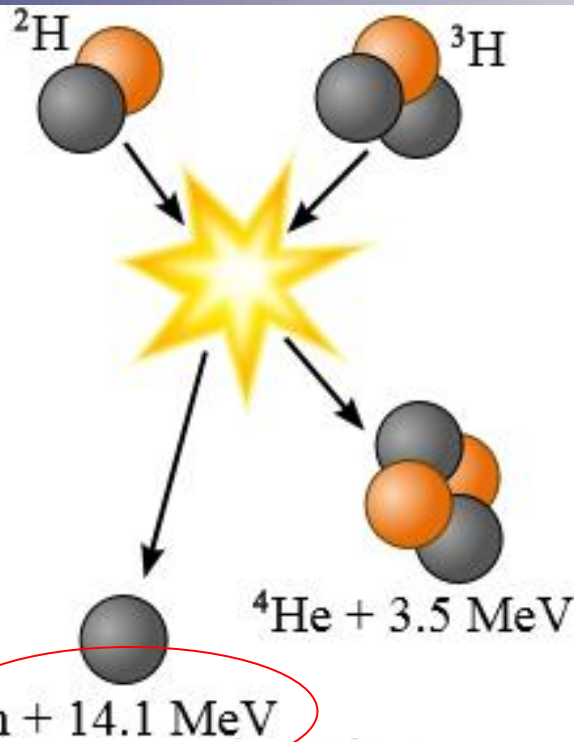


## Удельная энергия связи нуклона в ядре



Здесь возможен **синтез ядер**, но для преодоления Кулоновского барьера взаимодействующие ядра должны иметь энергию **не менее 1-10 кэВ!**

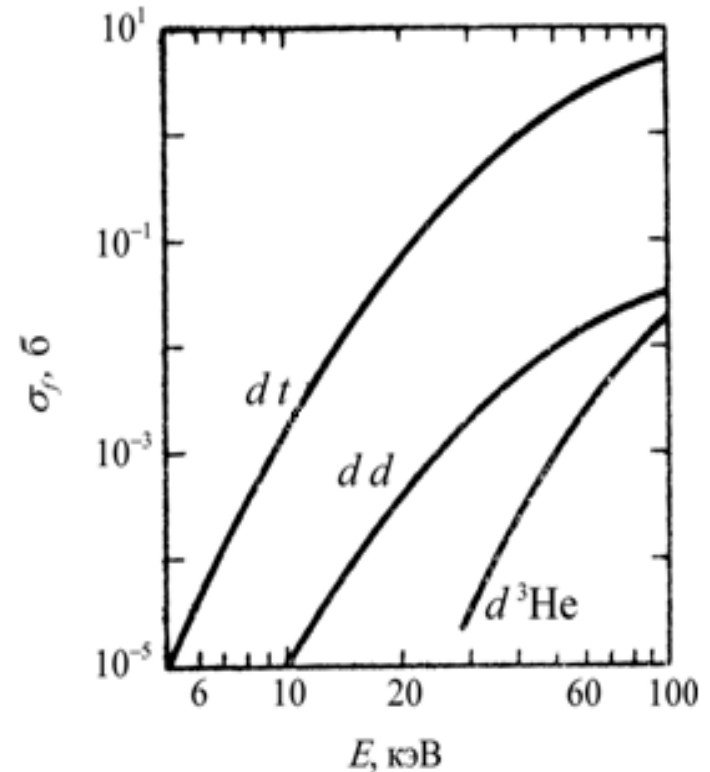
Здесь возможен **распад ядра** и цепная реакция может идти **на тепловых нейтронах (0.025 эВ)**

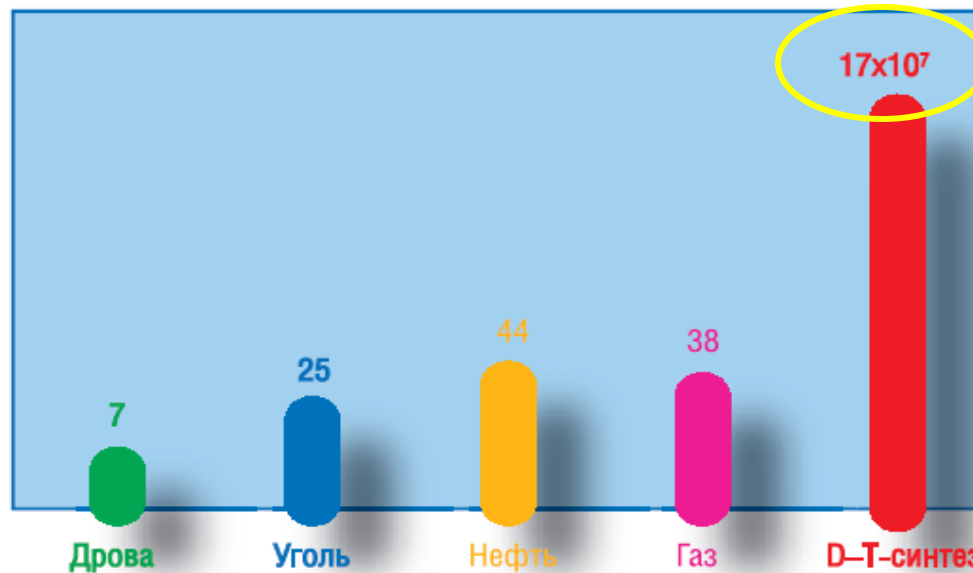


- Термоядерные реакции - ядерные реакции между лёгкими атомными ядрами, протекающие при очень высоких температурах

**>10 000 000 К**

- Т. р. в природных условиях протекают лишь в недрах звёзд, а для их осуществления на Земле необходимо сильно разогреть вещество ядерным взрывом, мощным газовым разрядом, гигантским импульсом лазерного излучения или бомбардировкой интенсивным пучком частиц





D-T-топливо в несколько миллионов раз калорийнее нефти



Вода

При «сжигании» дейтерия, содержащегося в бутылке воды, выделится столько же энергии, сколько при сжигании 1 бочки бензина



Бензин

**Калорийность 1 кг топлива, МДж**

## Основные характеристики термоядерной реакции



- Энерговыделение

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 + \frac{1}{2}m_Y v_Y^2 = Q$$

$$m_b v_b = m_Y v_Y$$

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 \approx \frac{Q}{1 + m_b/m_Y}$$

$$\frac{1}{2}m_Y v_Y^2 \approx \frac{Q}{1 + m_Y/m_b}$$

$$\frac{\frac{1}{2}m_b v_b^2}{\frac{1}{2}m_Y v_Y^2} = \frac{m_Y}{m_b}$$

Таким образом, лёгкая частица **b** уносит основную часть энергии:  
80% в D-T реакции и 75% в D-D реакции

- Кулоновский барьер

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X}{R_a + R_X} \approx 400 \text{ кэВ в D-T реакции}$$

$$R_a + R_X = R_{12} \approx 3.5 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

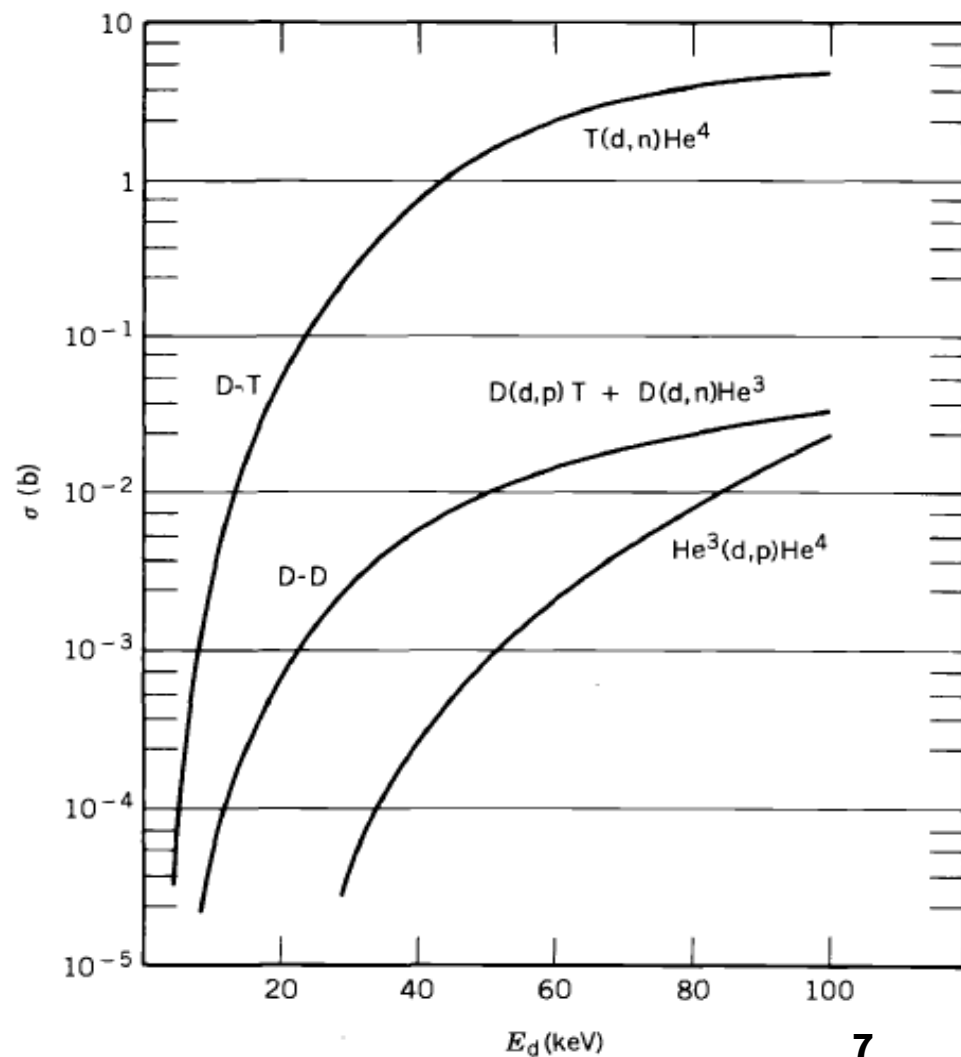
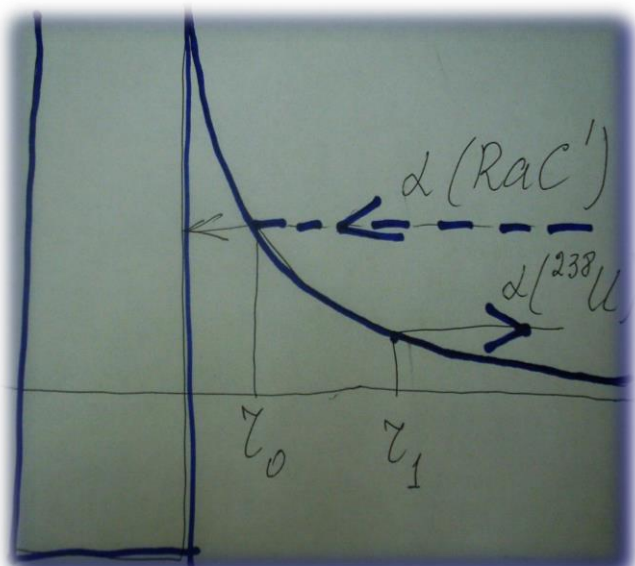
13 млн. °C !

- **Сечение реакции синтеза**

с учётом прозрачности потенциального барьера

$$\sigma \propto \frac{1}{v^2} e^{-2G}$$

где фактор Гамова  $G \simeq \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi Z_a Z_x}{\hbar v}$

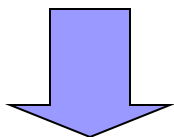


- Скорость реакции синтеза

$$\sim \sigma v$$

с учетом Максвелловско-Больцмановского распределения частиц по скоростям

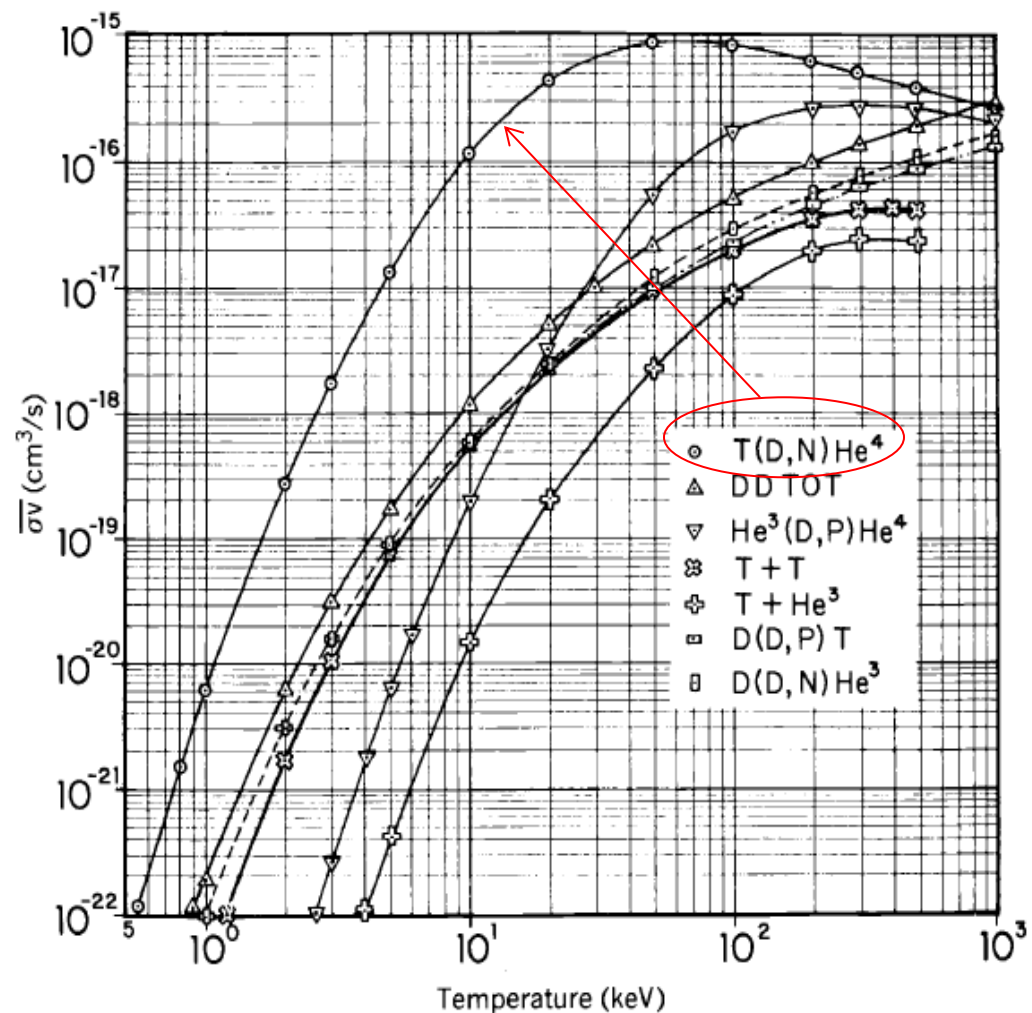
$$n(v) \propto e^{-mv^2/2kT}$$



$$\langle \sigma v \rangle \propto \int_0^\infty \frac{1}{v} e^{-2G} e^{-mv^2/2kT} v^2 dv$$

или

$$\langle \sigma v \rangle \propto \int_0^\infty e^{-2G} e^{-E/kT} dE$$



- **Энергетические характеристики**

Реакция*	Энерго-выделение, МэВ	$\sigma_{\text{макс}}$ , барн (в области энергии <1 МэВ)	Энергия налетающей частицы, МэВ, отвечающая $\sigma_{\text{макс}}$
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	0,42	$10^{-23}$	-
$p + D \rightarrow \text{He}^3 + \gamma$	5,5	$10^{-6}$	-
$D + D \rightarrow T + p$	4,0	0,16 (при 2 МэВ)	2,0
$D + D \rightarrow \text{He}^3 + p$	3,3	0,09	1,0
$D + T \rightarrow \text{He}^3 + n$	17,6	5	0,10
$D + T \rightarrow \text{He}^4 + n$	17,6	5	0,15
$T + T \rightarrow \text{He}^4 + n$	11,3	0,10	1,0
$D + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + p$	18,3	0,80	0,45
$n + \text{Li}^6 \rightarrow \text{He}^4 + T$	4,8	закон $\sigma \sim 1/v$	-
$p + \text{Li}^7 \rightarrow 2\text{He}^4$	17,3	$10^{-3}$	0,25
$D + \text{Li}^6 \rightarrow D + 2\text{He}^4$	22,4	0,026	0,60

\*Во всех приведенных реакциях налетающей частицей является первая слева.

- *Условия протекания реакции*



1. Достаточно *высокая кинетическая энергия исходных ядер*, которая соответствует температуре

$$T > 100 \text{ миллионов К .}$$

2. Выполняется *критерий Лоусона* для *параметра удержания* плазмы

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

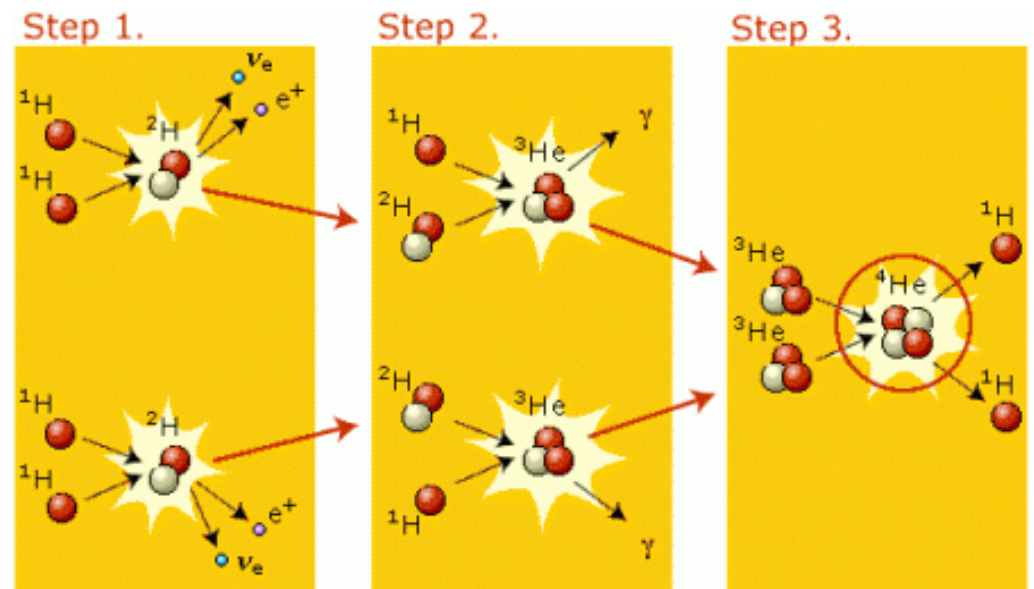
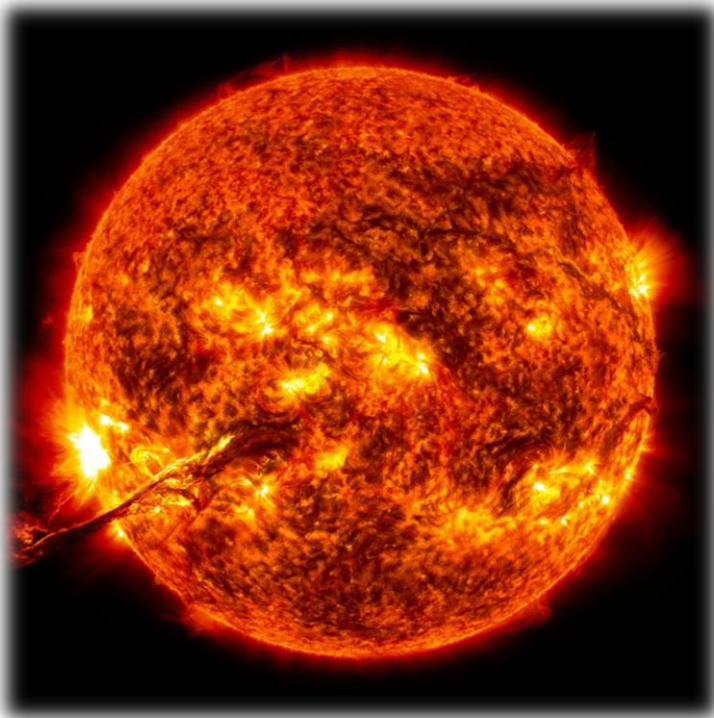
где *время удержания* плазмы  $\tau$  определяется запасом энергии в плазме  $Q$  и потерей энергии  $W$  на нагревание стенок, тормозное излучение, испускание нейтронов и т.д.

$$\tau = Q / W$$

## 2. Термоядерные реакции в звёздах

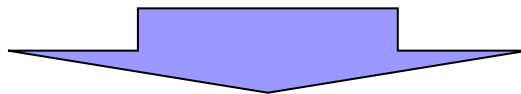
### Протон-протонный цикл

*очень медленная реакция ( $7,9 \cdot 10^9$  лет), так как обусловлена слабым взаимодействием*

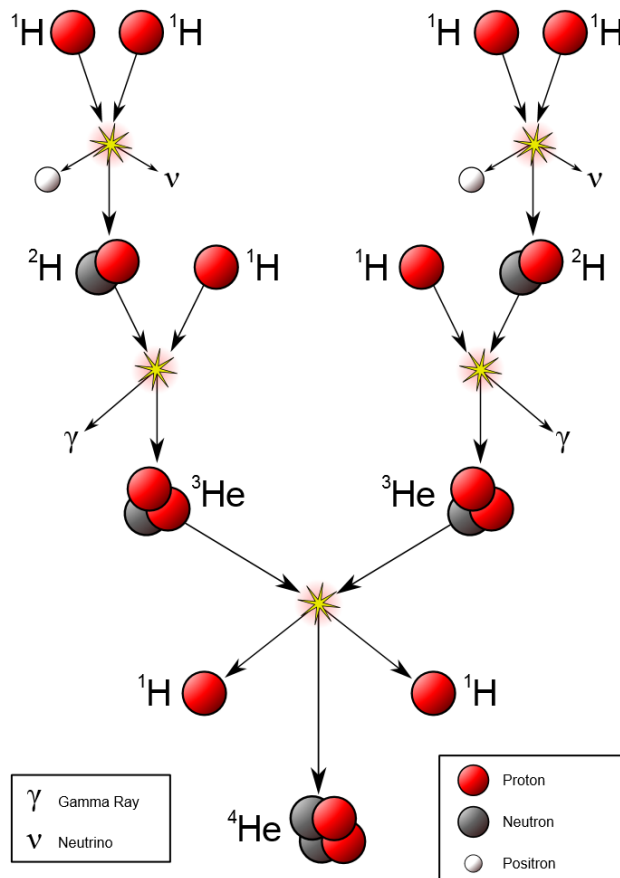


В 1935 году Ханс Бёте предположил, что источником солнечной энергии может быть термоядерная реакция превращения водорода в гелий

Самоподдерживающаяся термоядерная реакция внутри Солнца, где находятся ядра водорода при плотности  $\approx 100 \text{ г/см}^3$  и температуре  $10^7 \text{ К}$

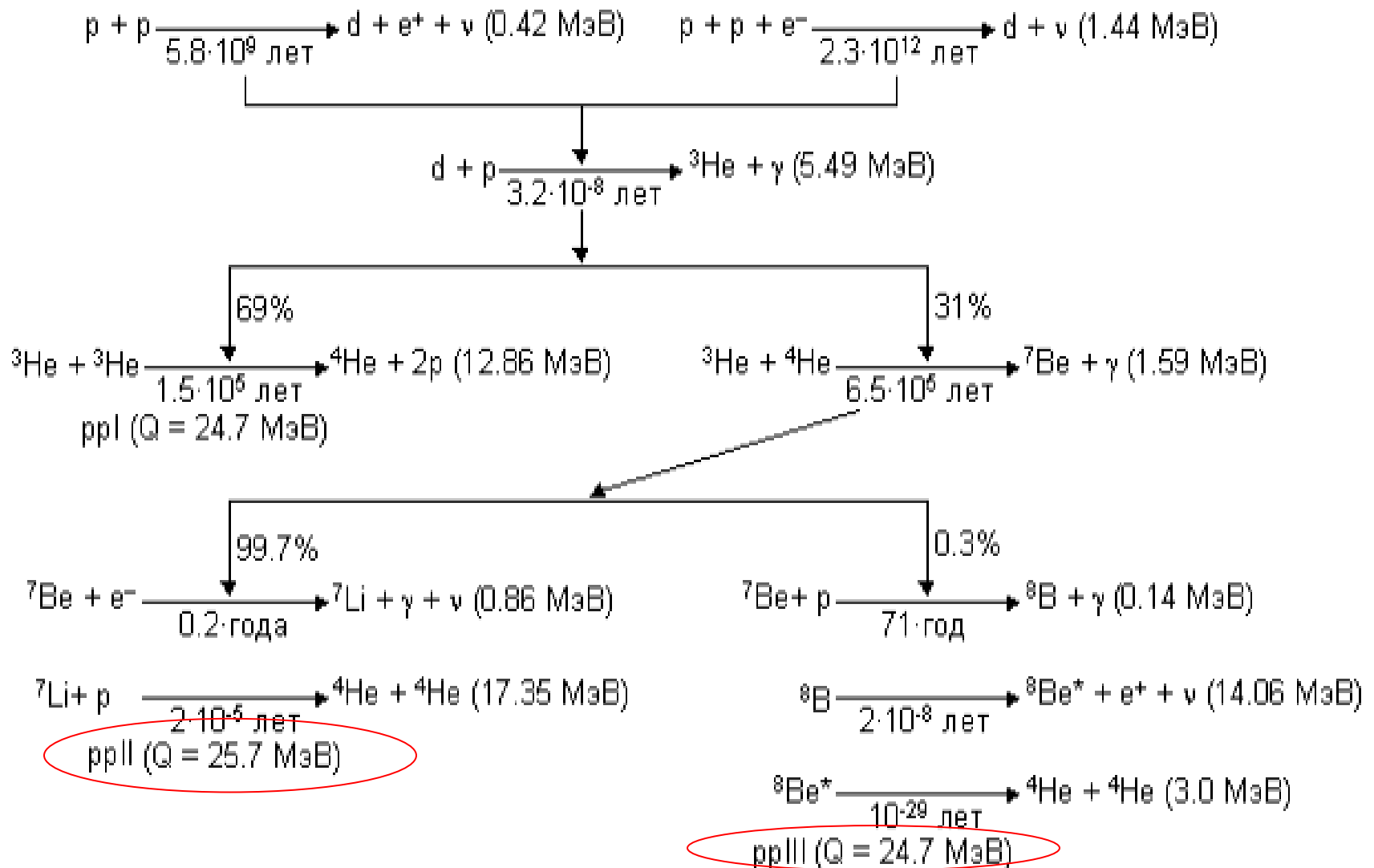


цепочка термоядерных реакций превращения *четырёх протонов* (ядер водорода) *в ядро гелия-4* ( $^4\text{He}$ ).



Такая реакция доминирует в звёздах размера нашего Солнца и меньше

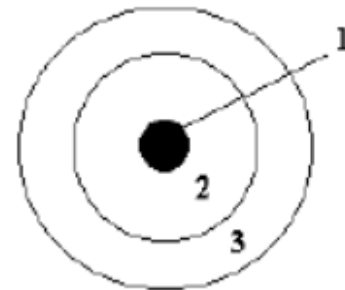
## Различные сценарии протекания реакций pp-цикла



## Стандартная модель Солнца



$$R = 6.96 \cdot 10^{10} \text{ см} \quad M = 1.989 \cdot 10^{33} \text{ г}$$



$$E_{\odot} = 2 \text{ эрг/г} \cdot \text{с} \quad 4 \text{ млн.т./сек}$$

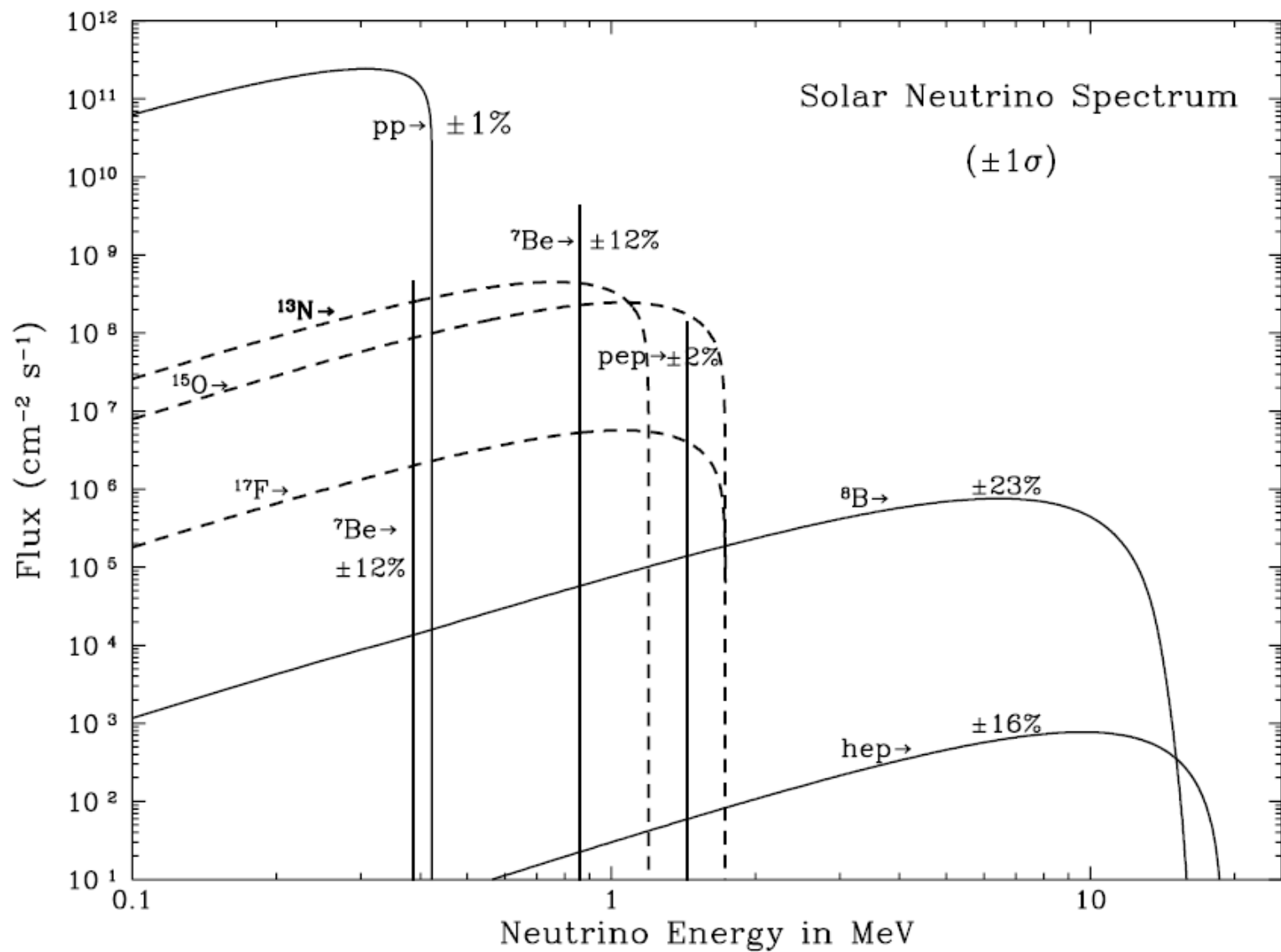
$$T \approx 15 \cdot 10^6 \text{ К}$$

$$P \sim 10^9 \text{ атм.}$$

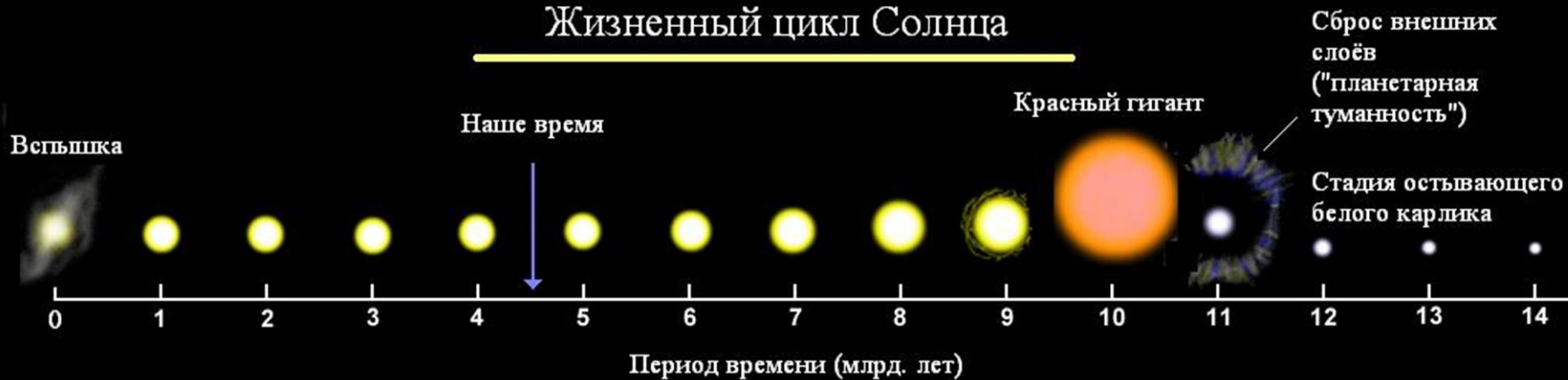
- 1 – внутренняя зона с  $\rho \sim 150 \text{ г/см}^3$  (конвективная)  
 2 – статическая радиационная зона,  $\rho$ ;  
 3 – внешняя конвективная зона,  $\rho \sim 1.5 \text{ г/см}^3$ .

### Предсказания Стандартной модели Солнца

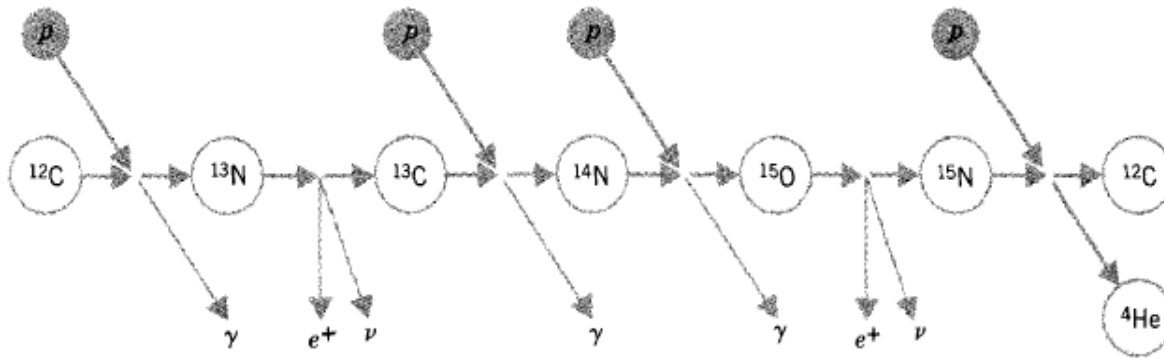
Источник	Поток $\nu \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
pp	6.01
pep	$1.44 \cdot 10^{-2}$
$^8\text{B}$	$4.85 \cdot 10^{-4}$
$^7\text{Be}$	$4.53 \cdot 10^{-1}$
$^{13}\text{N}$	$4.07 \cdot 10^{-2}$
$^{15}\text{O}$	$3.45 \cdot 10^{-2}$
$^{17}\text{F}$	$4.02 \cdot 10^{-4}$



## Жизненный цикл Солнца

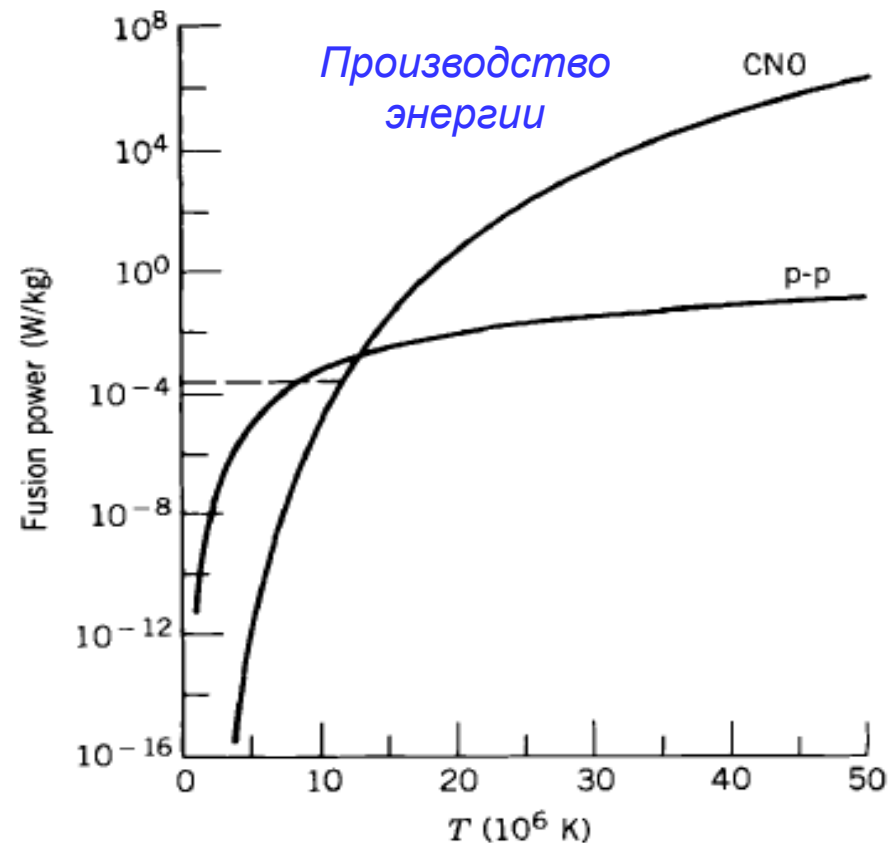
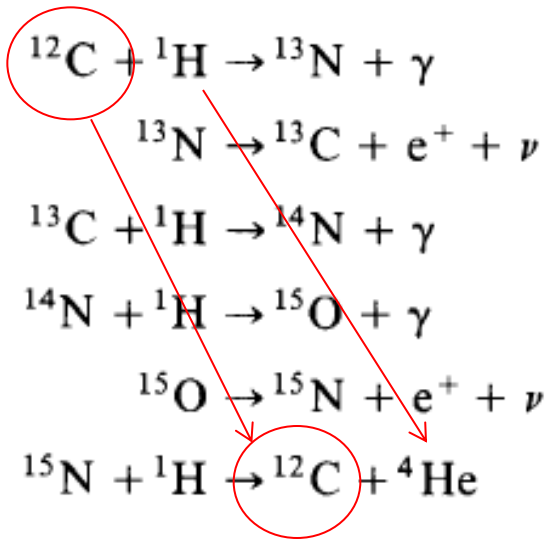


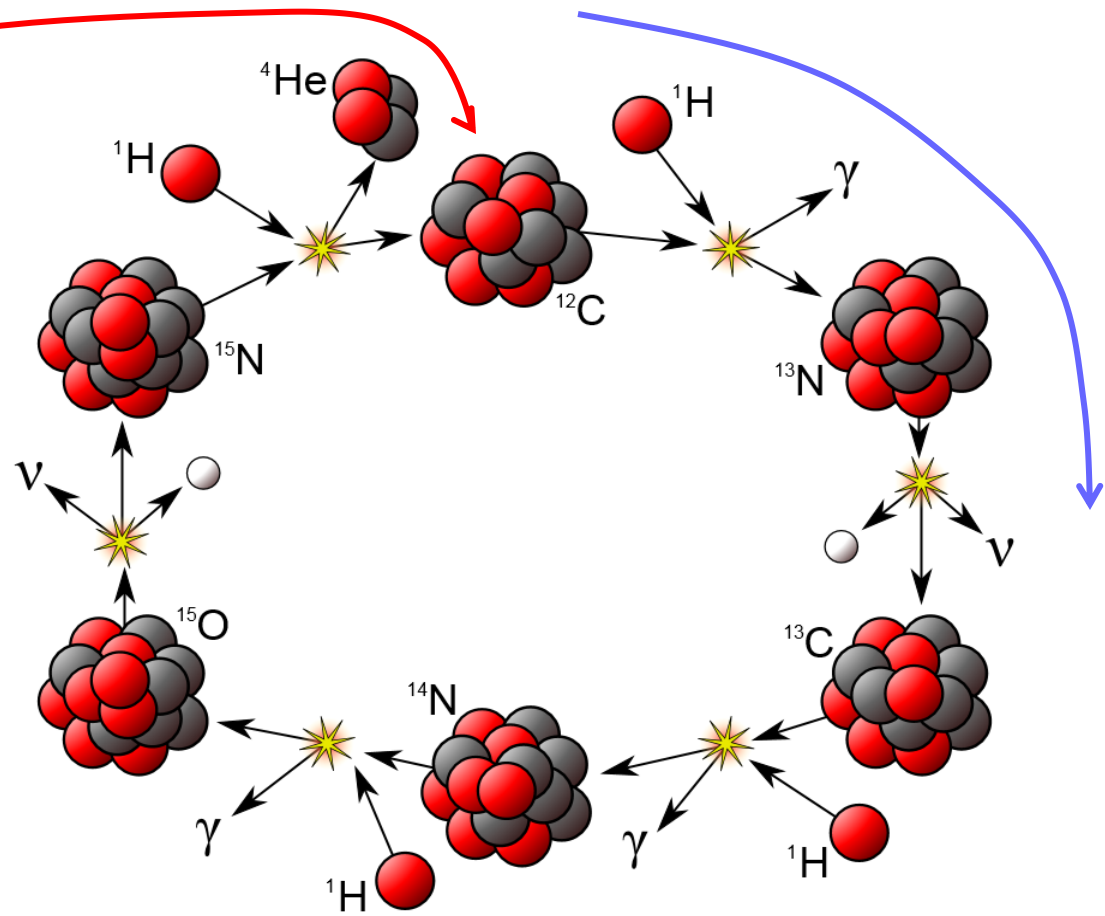
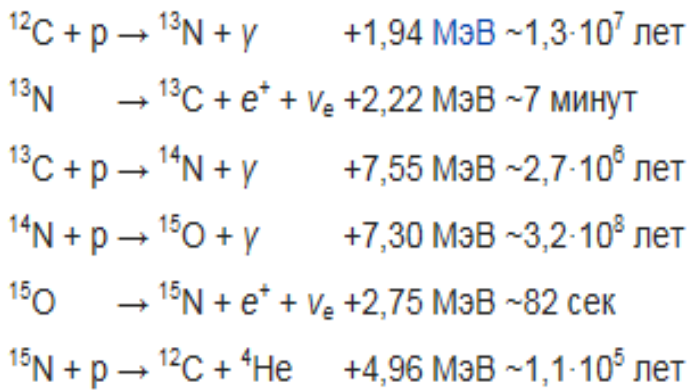
## Углеродный (CNO) цикл в массивных звёздах






Предложен в 1938 г.  
Х.А.Бёте и независимо  
К.Ф.Вайцеккером.  
Н.п. 1967 Бёте

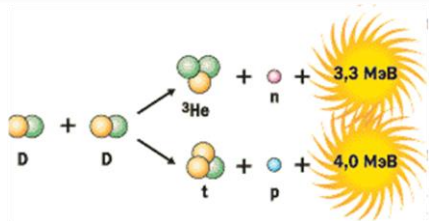
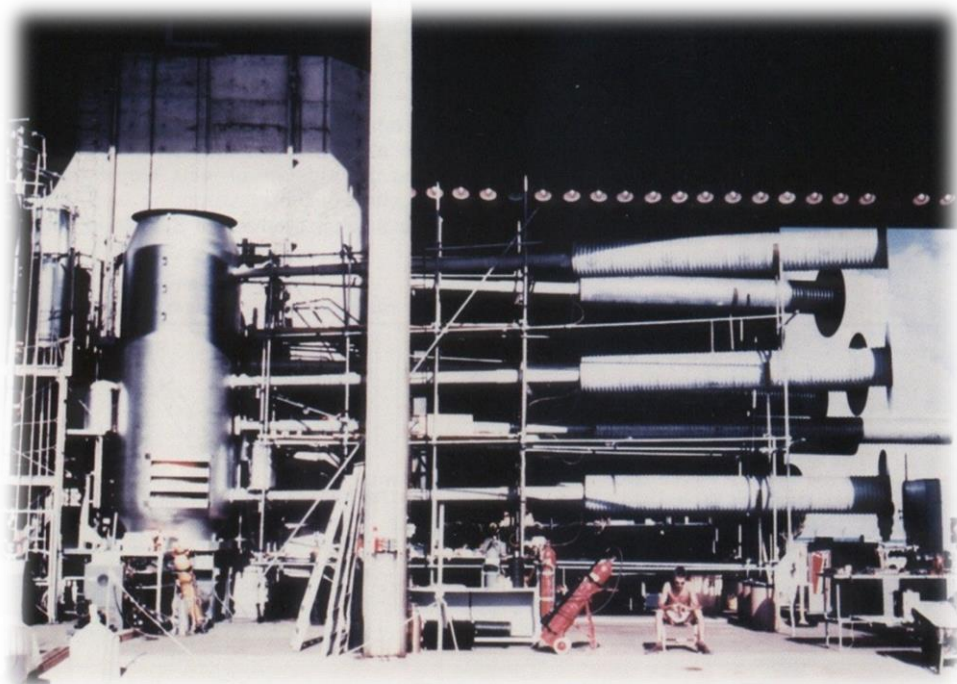
Тяжёлые ядра играют роль катализаторов





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

### 3. Термоядерное оружие



**Ivy Mike** detonated on November 1, 1952 by the United States on Enewetak atoll in the Pacific Ocean, as part of *Operation Ivy*.

*10.4 megatons of TNT*

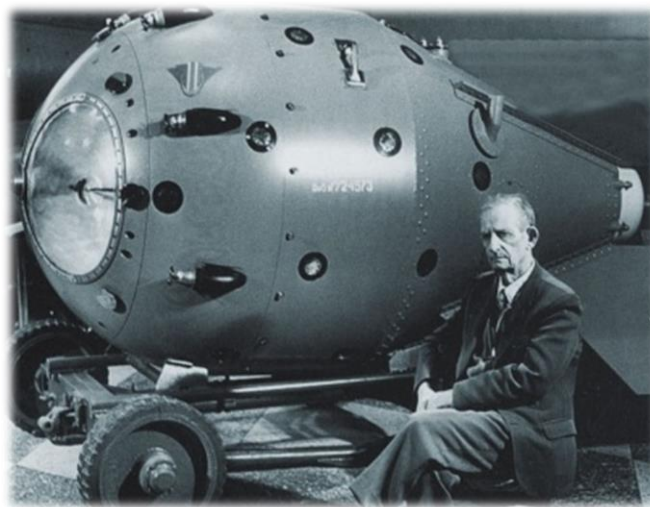
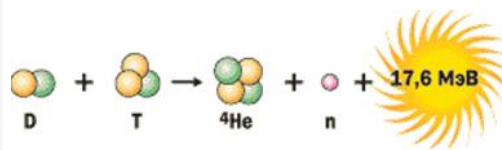
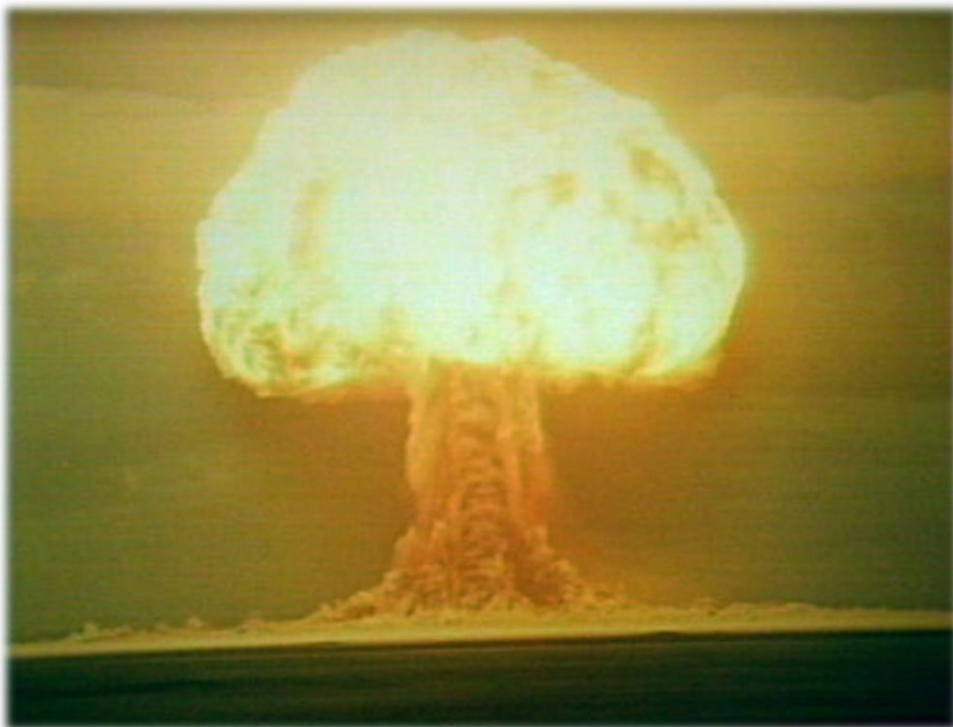


**РДС-6с** — первая в мире водородная **авиабомба**.

«Слойка» испытана на Семипалатинском полигоне 1 августа 1953 г.

Мощность **400 кт**; КПД 15-20 %.

В дальнейшем бомба была модернизирована: вместо **тринития** был использован **гидрид лития-6**, мощность взрыва РДС-27 составила **250 кт** (6 ноября 1955 года).

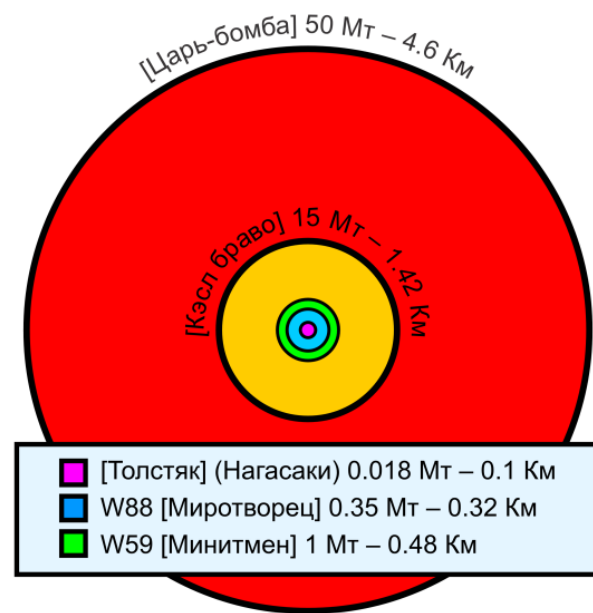


Разработана в КБ-11 Министерства среднего машиностроения СССР под руководством Ю.Б.Харитона, расчёты - группа Я.Б.Зельдовича, общее руководство И.Д.Курчатова.

В качестве носителя использовался стратегический бомбардировщик Ту-95А



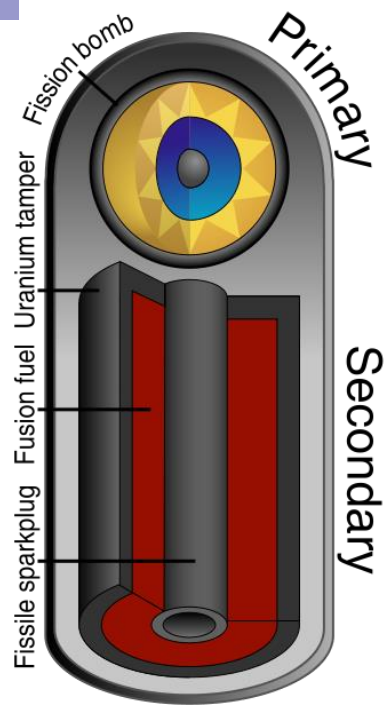
Натурный макет «Царь-бомбы» АН602 в Музее ядерного оружия РФЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров)



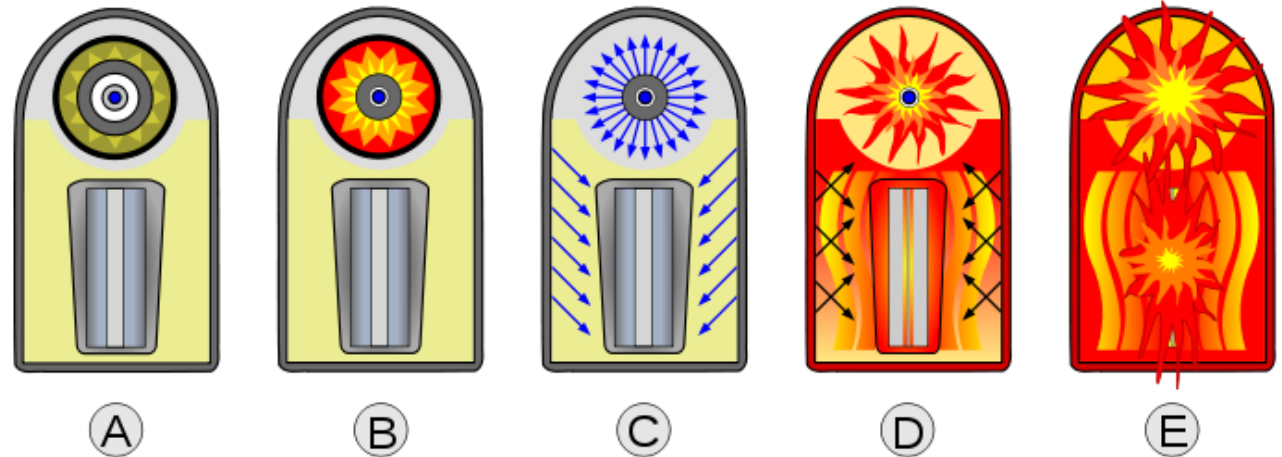
### ***АН602 («Царь-бомба» или «Кузькина мать»)***

термоядерная авиационная бомба АН602 разработана в СССР в 1954—1961 гг. под руководством академика И. В. Курчатова - самое мощное взрывное устройство, созданное человеком.

Полная энергия взрыва 30 октября 1961 г. от **57 до 58,6 мегатонн** в тротиловом эквиваленте, или около  $2,4 \cdot 10^{17}$  Дж, что соответствует дефекту массы 2,65 кг.



## Схема Теллера-Улама

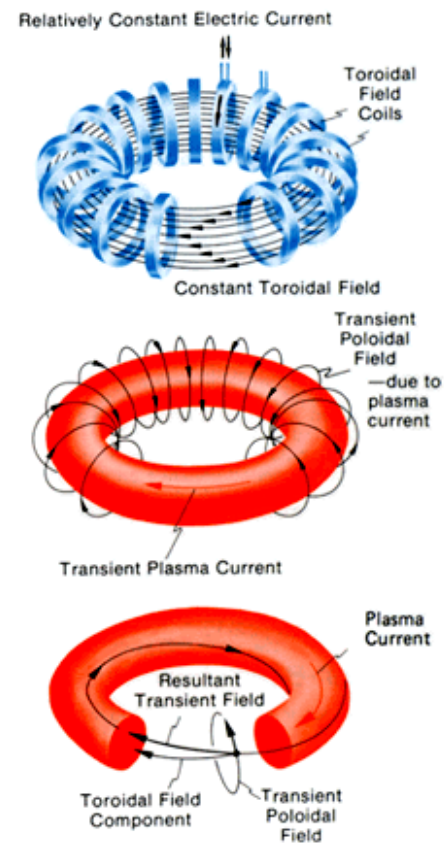
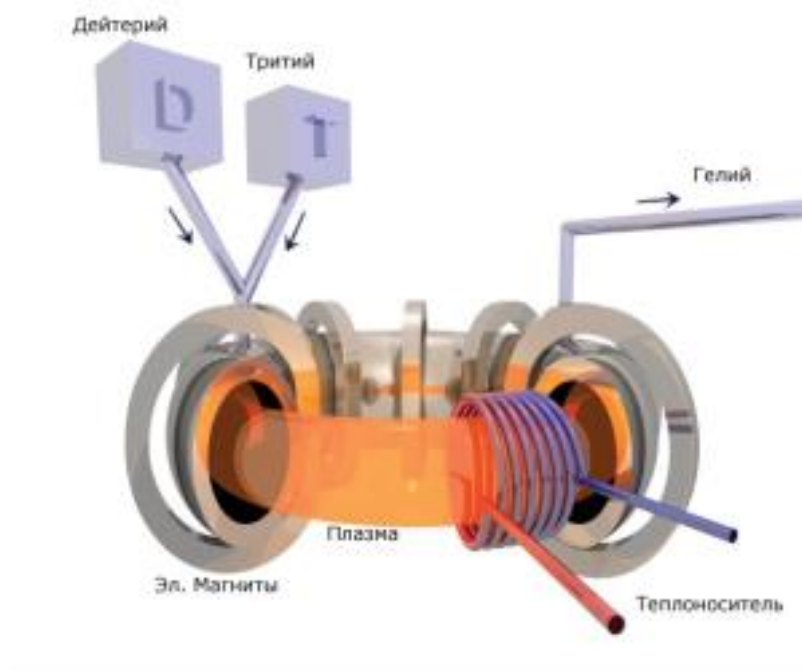
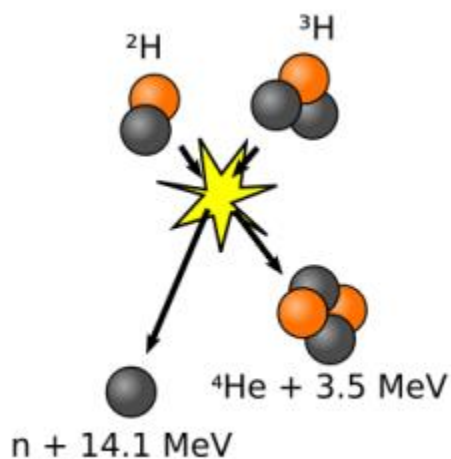


- A. Боеголовка перед взрывом; первая ступень сверху, вторая ступень внизу. Оболочка из урана или свинца, отражающего быстрые нейтроны.
- B. Взрывчатое вещество подрывает первую ступень, сжимая **ядро плутония** до сверхкритического состояния и инициируя **цепную реакцию расщепления**.
- C. В процессе расщепления в первой ступени происходит **импульс рентгеновского излучения**, который распространяется вдоль внутренней части оболочки, проникая через наполнитель из пенополистирола.
- D. Вторая ступень сжимается вследствие абляции (испарения) тяжёлой оболочки под воздействием рентгеновского излучения, и **плутониевый стержень переходит в сверхкритическое состояние**, **инициируя цепную реакцию**, сжимая и нагревая центральный стержень из ***LiD***.
- E. В сжатом и разогретом **дейтериде лития-6** происходит реакция синтеза

## 4. Управляемые термоядерные реакции

В настоящее время рассматриваются две основные схемы УТ синтеза:

1. **Квазистационарные системы** (  $\tau \geq 1c, n \geq 10^{14} \text{cm}^{-3}$  ) - нагрев и удержание плазмы осуществляется магнитным полем при относительно низком давлении и высокой температуре.



Выдающиеся российские ученые под руководством академика Л.А. Арцимовича разработали и реализовали концепцию термоядерной установки **ТОКАМАК** (Торoidalная Камера МАгнитная Катушка)

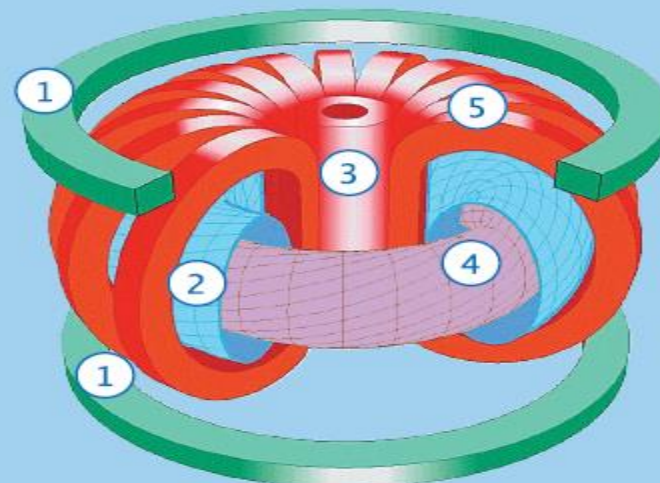


Академик Л.А. Арцимович  
(1909–1973 гг.)

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

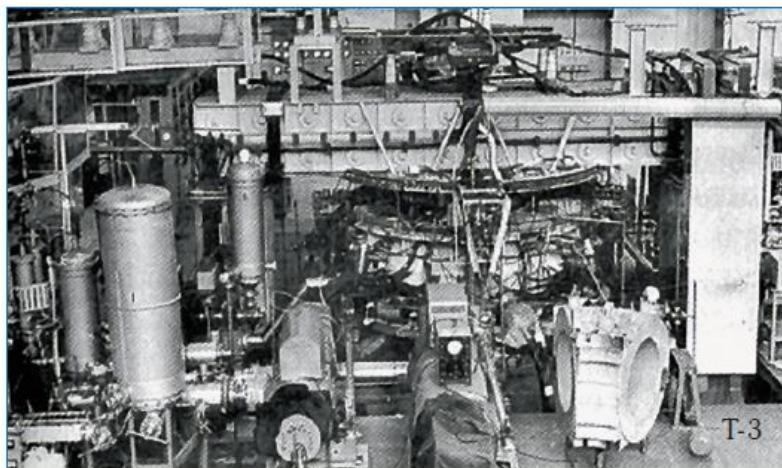
Академик Б.Б. Кадомцев  
(1928–1998 гг.)

В 1968 году на Международной конференции по физике плазмы ученые из ИАЭ им. И.В. Курчатова доложили о получении на установке «Токамак-3» устойчиво удерживаемой плазмы с температурой около 5 млн градусов. Это намного превосходило все, что было достигнуто в мире по другим направлениям исследований. За рубежом начался «токамачный» бум.



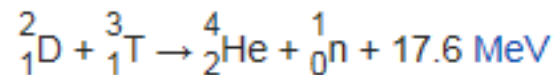
- 1 - катушки полоидального магнитного поля
- 2 - вакуумная камера
- 3 - индуктор
- 4 - плазма
- 5 - катушки тороидального магнитного поля

**Схема классического токамака**



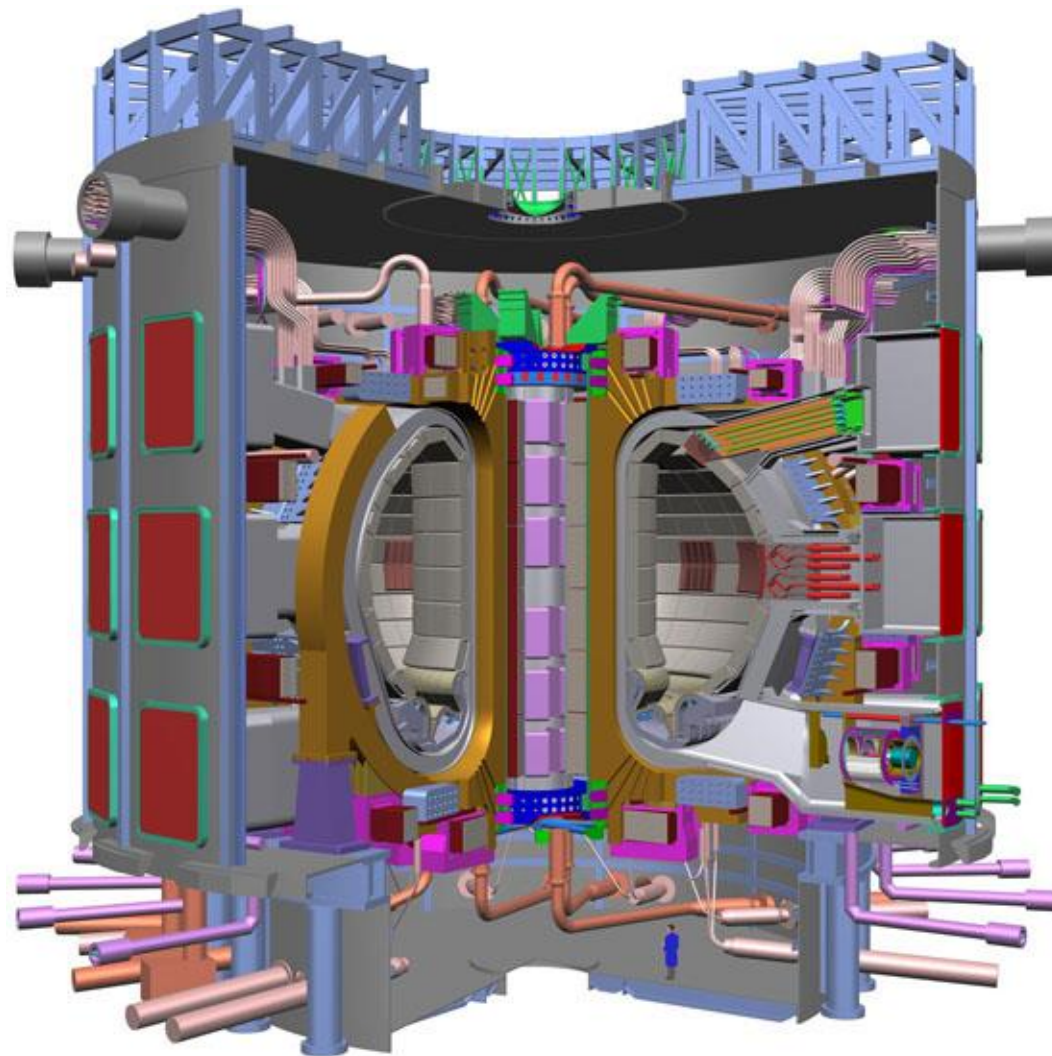
*Установка Токамак-3*

# International Thermonuclear Experimental Reactor (ИТЭР)

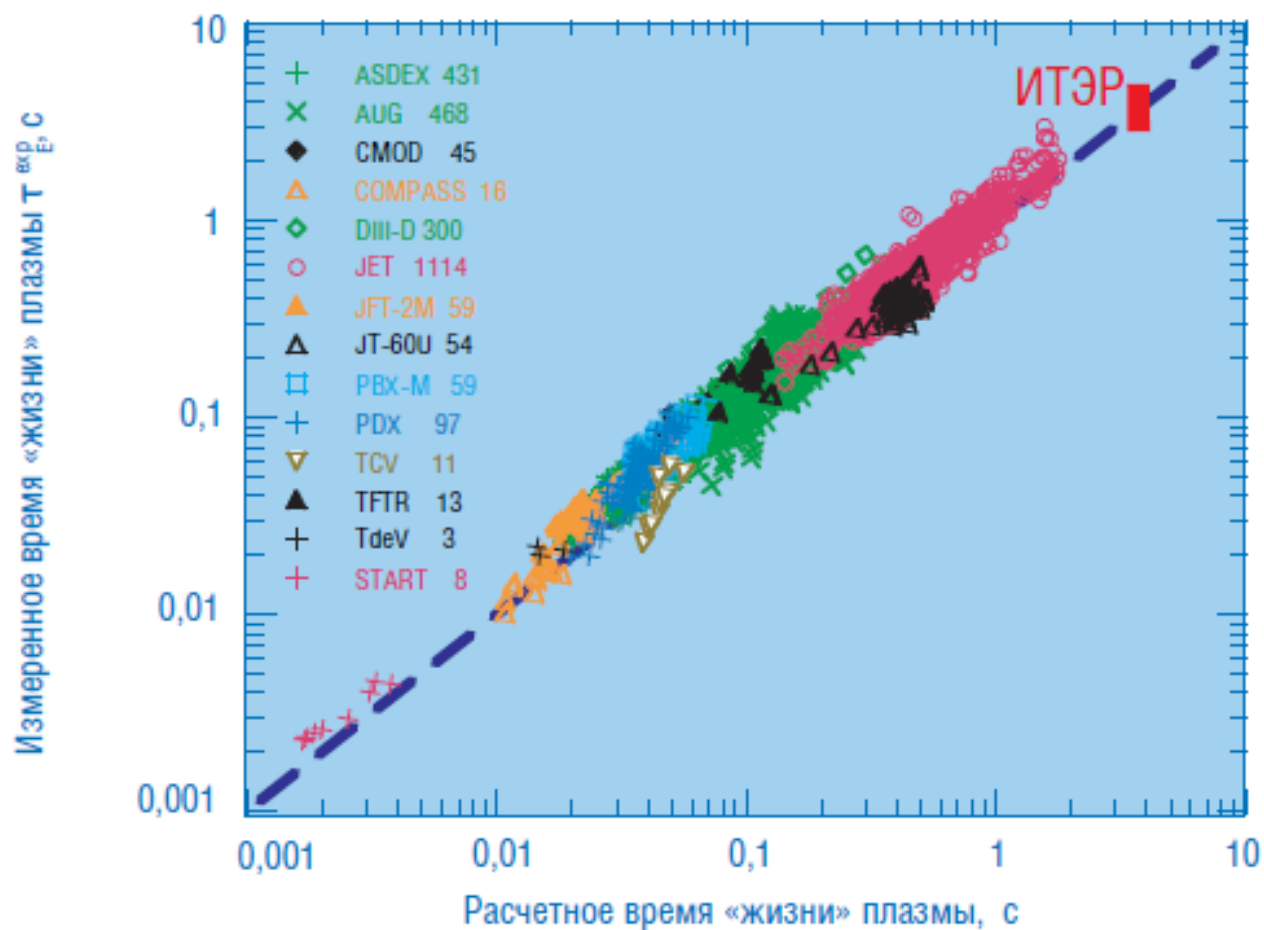


ITER began in 1985 as a Reagan–Gorbachev initiative

Полная термоядерная мощность, МВт	500(700)
Отношение термоядерной мощности к мощности дополнительного нагрева, $Q$	$\geq 10$
Средняя нейтронная нагрузка на стенку, МВт/м <sup>2</sup>	0,57(0,8)
Время горения плазмы в индуктивном режиме, с	$\geq 400$
Большой радиус плазмы, м	6,2
Малый радиус плазмы, м	2,0
Ток плазмы, МА	15 (17)
Тороидальное магнитное поле на оси, Тл	5,3
Объем плазмы, м <sup>3</sup>	837
Площадь поверхности плазмы, м <sup>2</sup>	678
Мощность дополнительного нагрева, МВт	73



## Соотношение экспериментальных данных с расчетными





Строительная площадка ИТЭР в 2015 году

Срок начала экспериментов - 2027 год



Строительная площадка ИТЭР в июле 2016 года

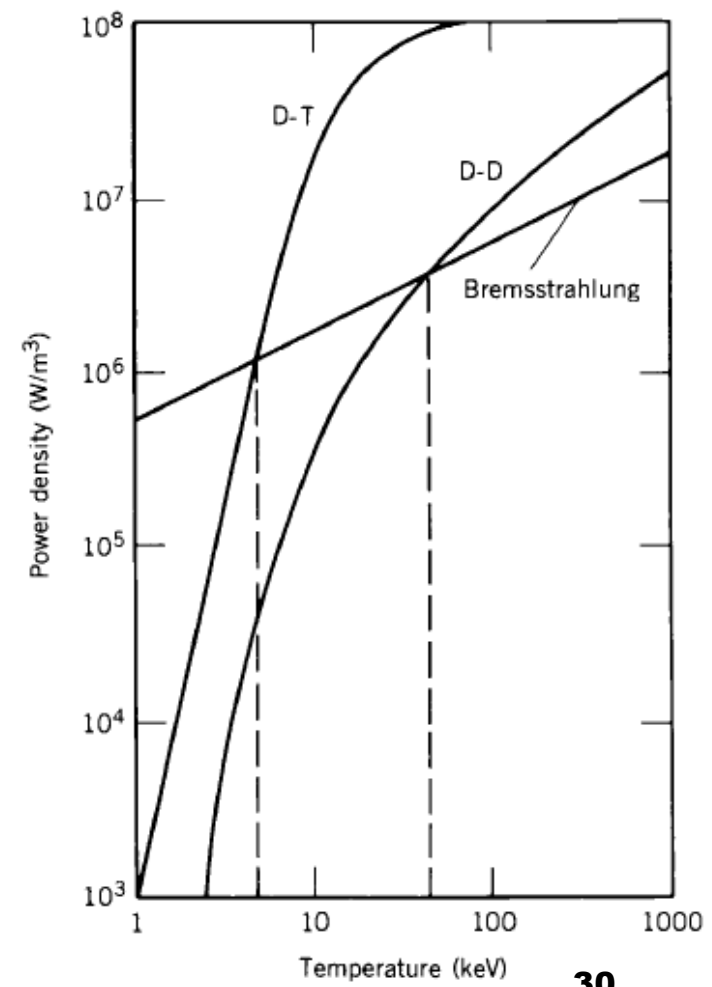
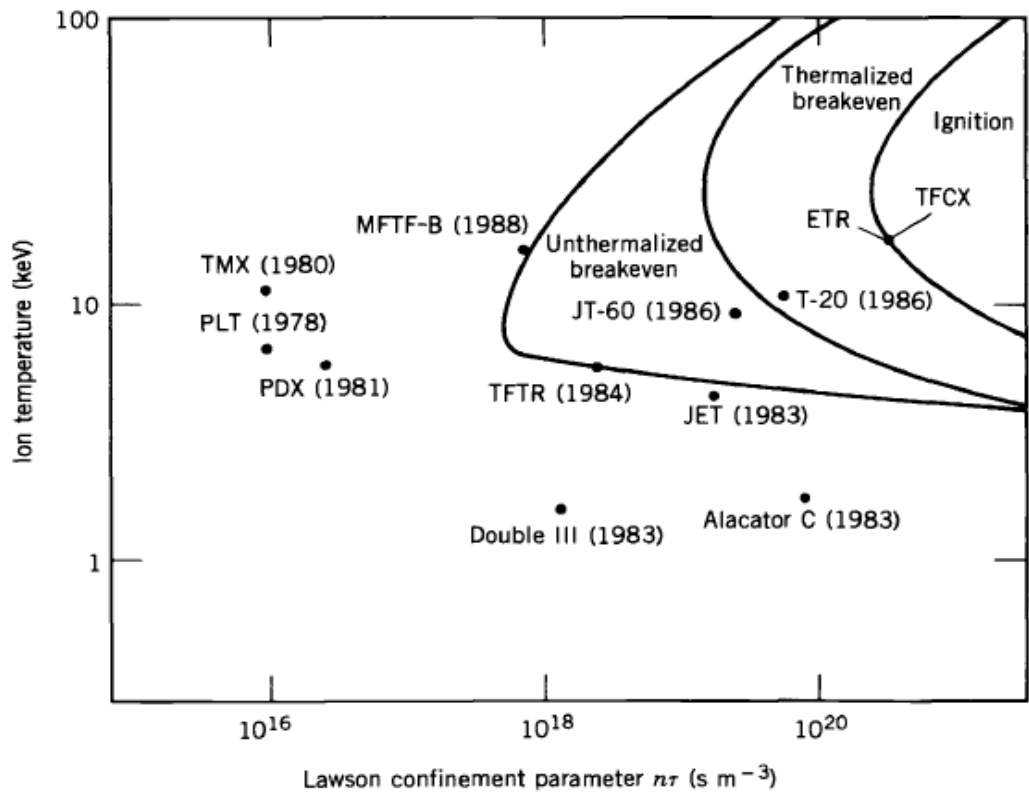
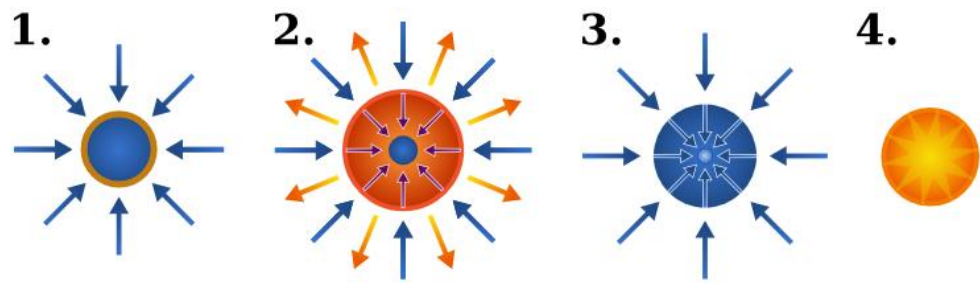
### Original schedule

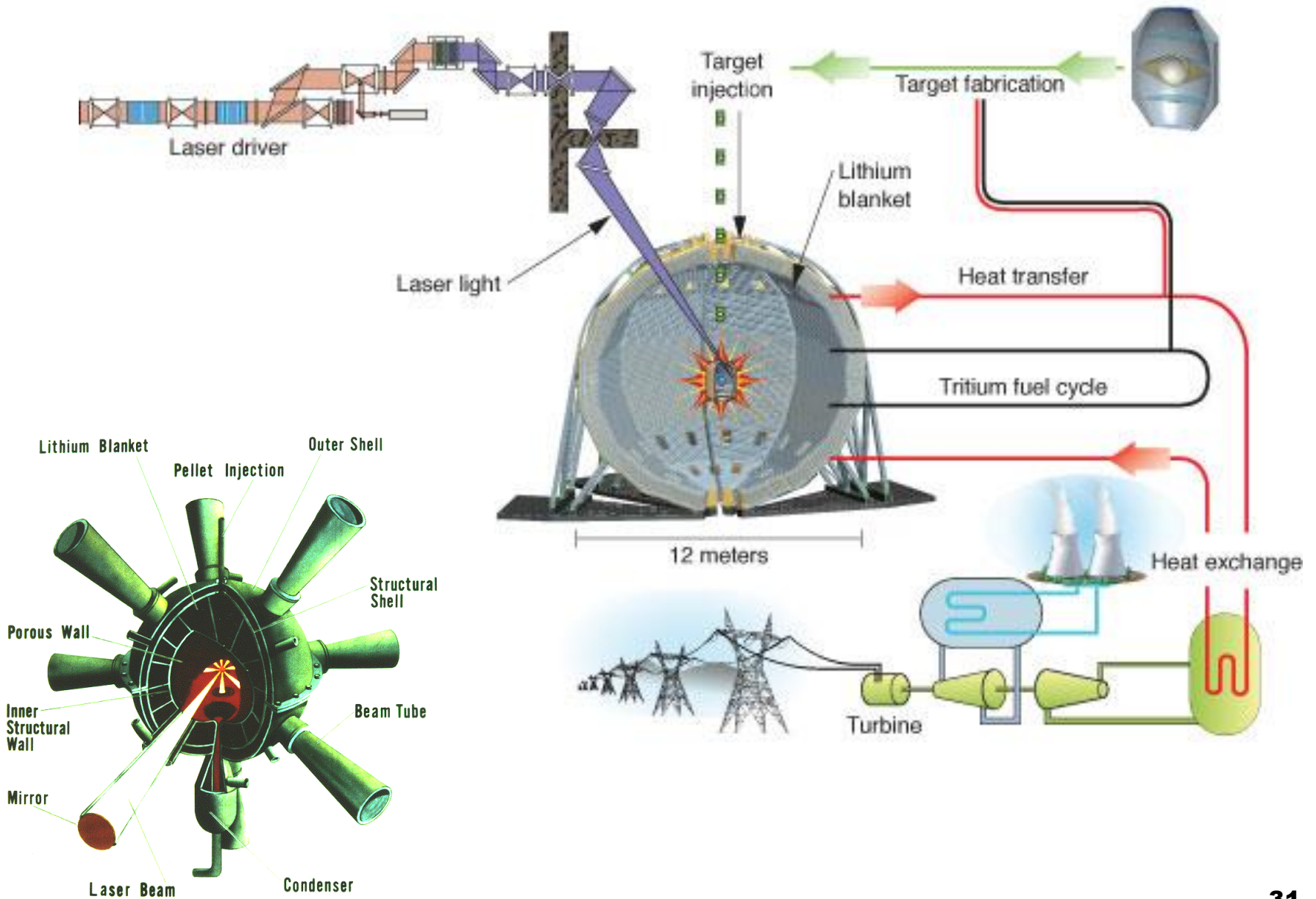
Date	Event
2006-11-21	Seven participants formally agreed to fund the creation of a nuclear fusion reactor. <sup>[12]</sup>
2008	Site preparation start, ITER itinerary start. <sup>[36]</sup>
2009	Site preparation completion. <sup>[36]</sup>
2010	Tokamak complex excavation starts. <sup>[26]</sup>
2013	Tokamak complex construction starts. <sup>[36]</sup>
2015	Tokamak assembly starts. <sup>[37]</sup>
2019	Predicted: Tokamak assembly completion, torus pumpdown starts. <sup>[36]</sup>
2020	Predicted: Achievement of first plasma. <sup>[36]</sup>
2027	Predicted: Start of deuterium–tritium operation. <sup>[36]</sup>

### Participating countries

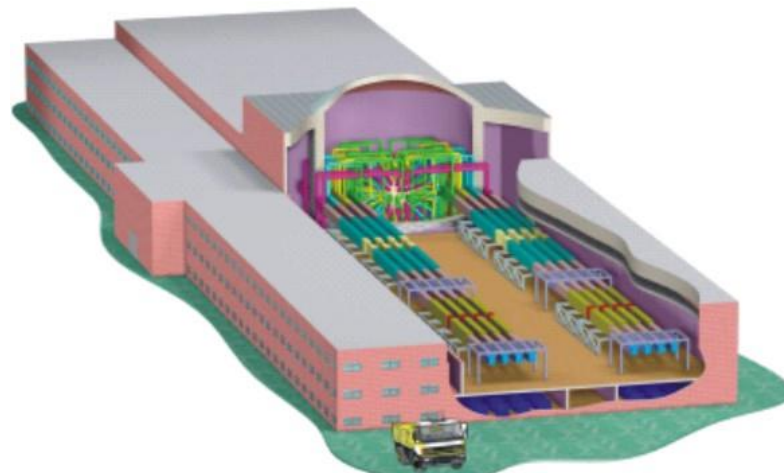
-  Austria
-  Belgium
-  Bulgaria
-  China
-  Croatia
-  Cyprus
-  Czech Republic
-  Denmark
-  Estonia
-  Finland
-  France
-  Germany
-  Greece
-  Hungary
-  India
-  Ireland
-  Italy
-  Japan
-  Latvia
-  Lithuania
-  Luxembourg
-  Malta
-  Netherlands
-  Poland
-  Portugal
-  Romania
-  Russia
-  Slovakia
-  Slovenia
-  South Korea
-  Spain
-  Sweden
-  Switzerland
-  United Kingdom
-  United States

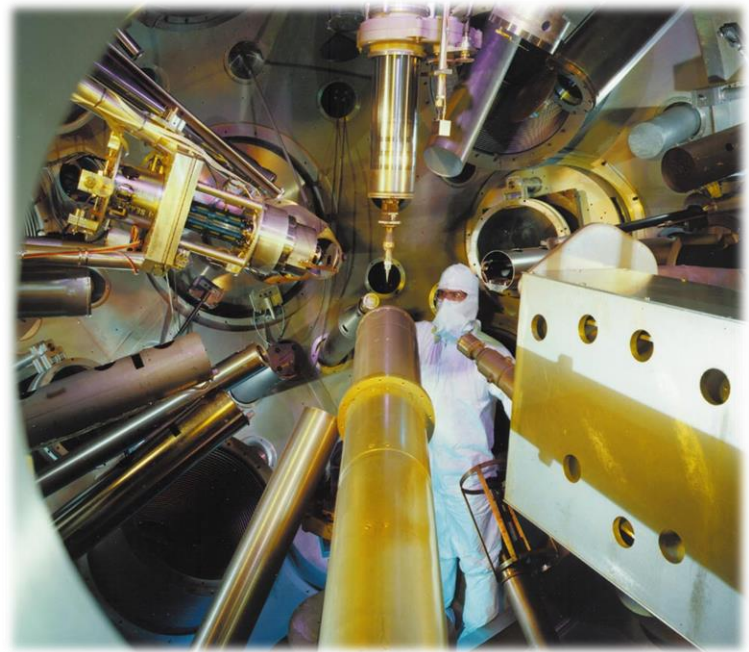
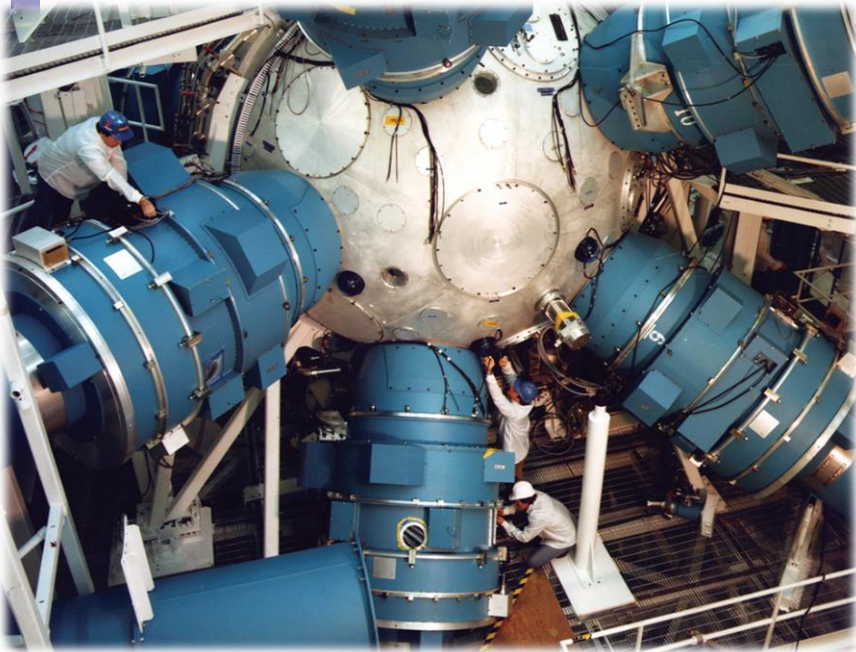
2. **Импульсные системы** (  $\tau \sim 10^{-8} \text{ c}, n \geq 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  ) - инерционный термоядерный синтез путём нагрева небольших мишеней, содержащих дейтерий и тритий, импульсными пучками высокоэнергичных частиц или лазерного излучения





В 1989 году в РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) была запущена 12-канальная установка **Искра-5** мощностью 120 ТВт ( $10^{12}Вт$ )

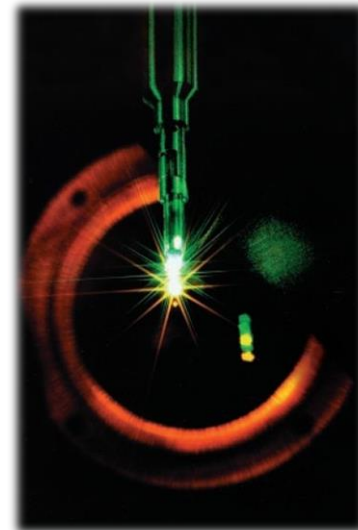




**1984-1999 Nova** laser fusion facility at *Lawrence Livermore Laboratory* (USA):  
 $1,5 \text{ PW} = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ W}$  (1999)



10 beam LLNL Nova laser

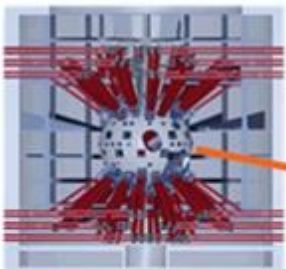
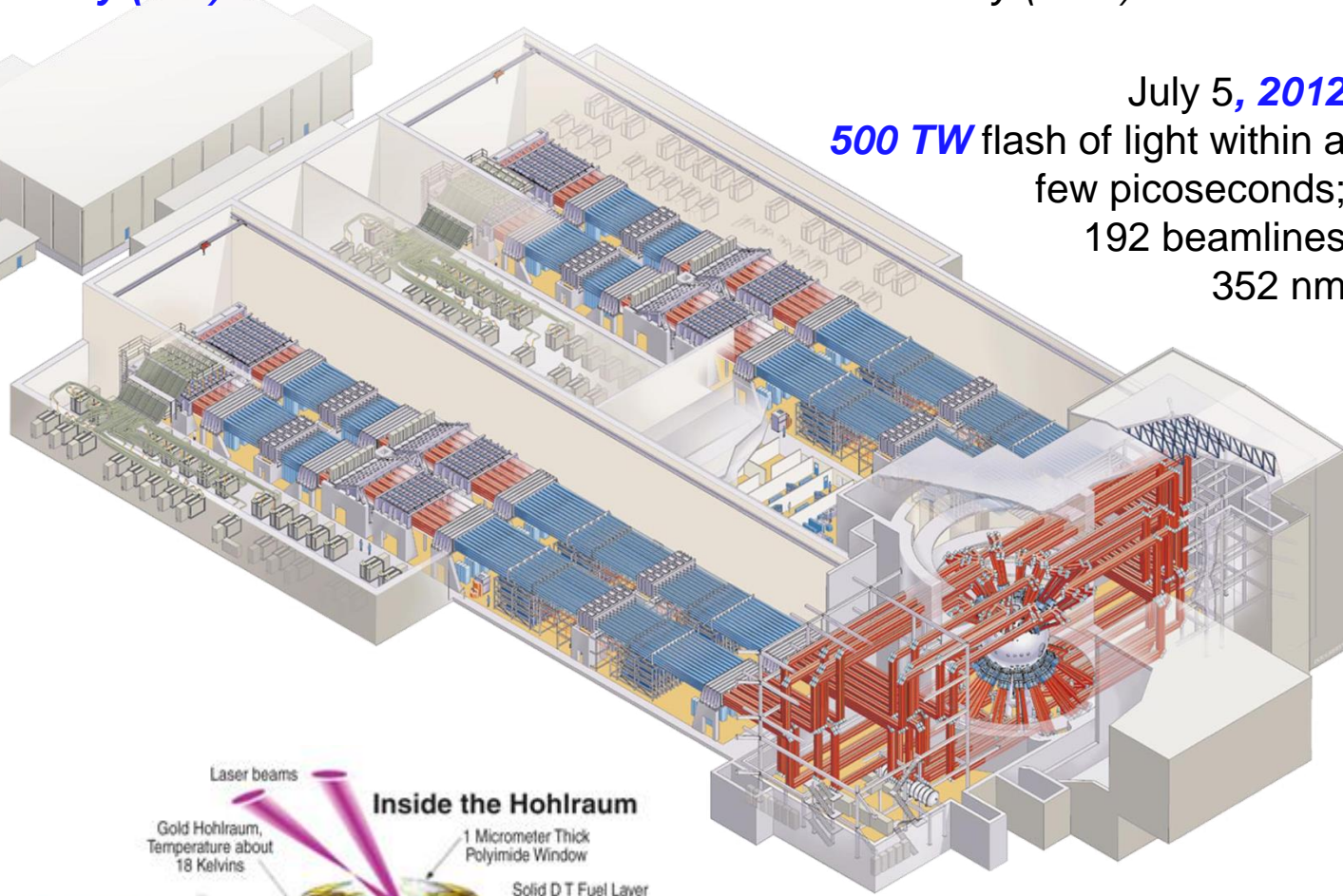
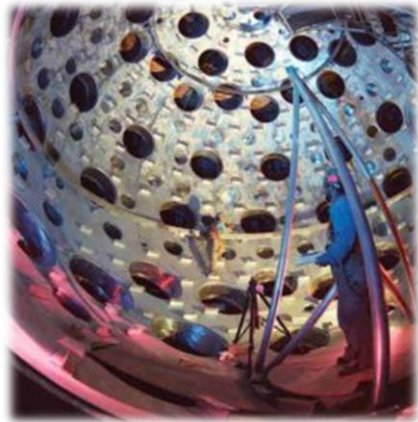




# National Ignition Facility (NIF) at Lawrence Livermore National Laboratory (USA)

July 5, 2012

**500 TW** flash of light within a few picoseconds;  
192 beamlines  
352 nm

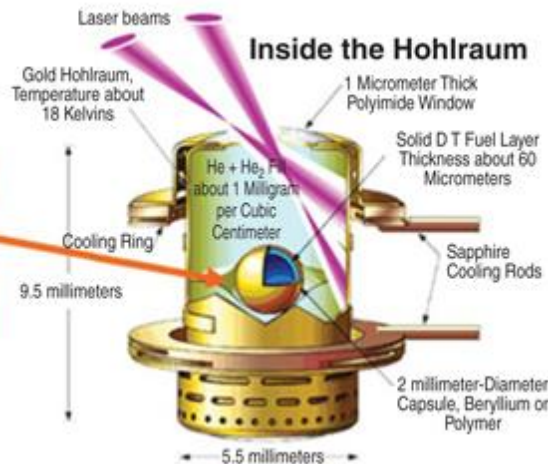


← Chamber

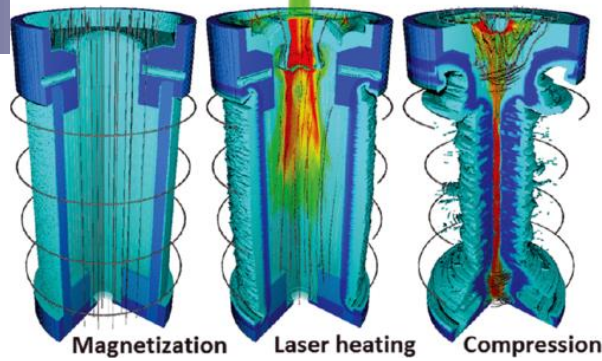
192 Laser Beams Converge onto Target at Center of 10 m Diameter Chamber



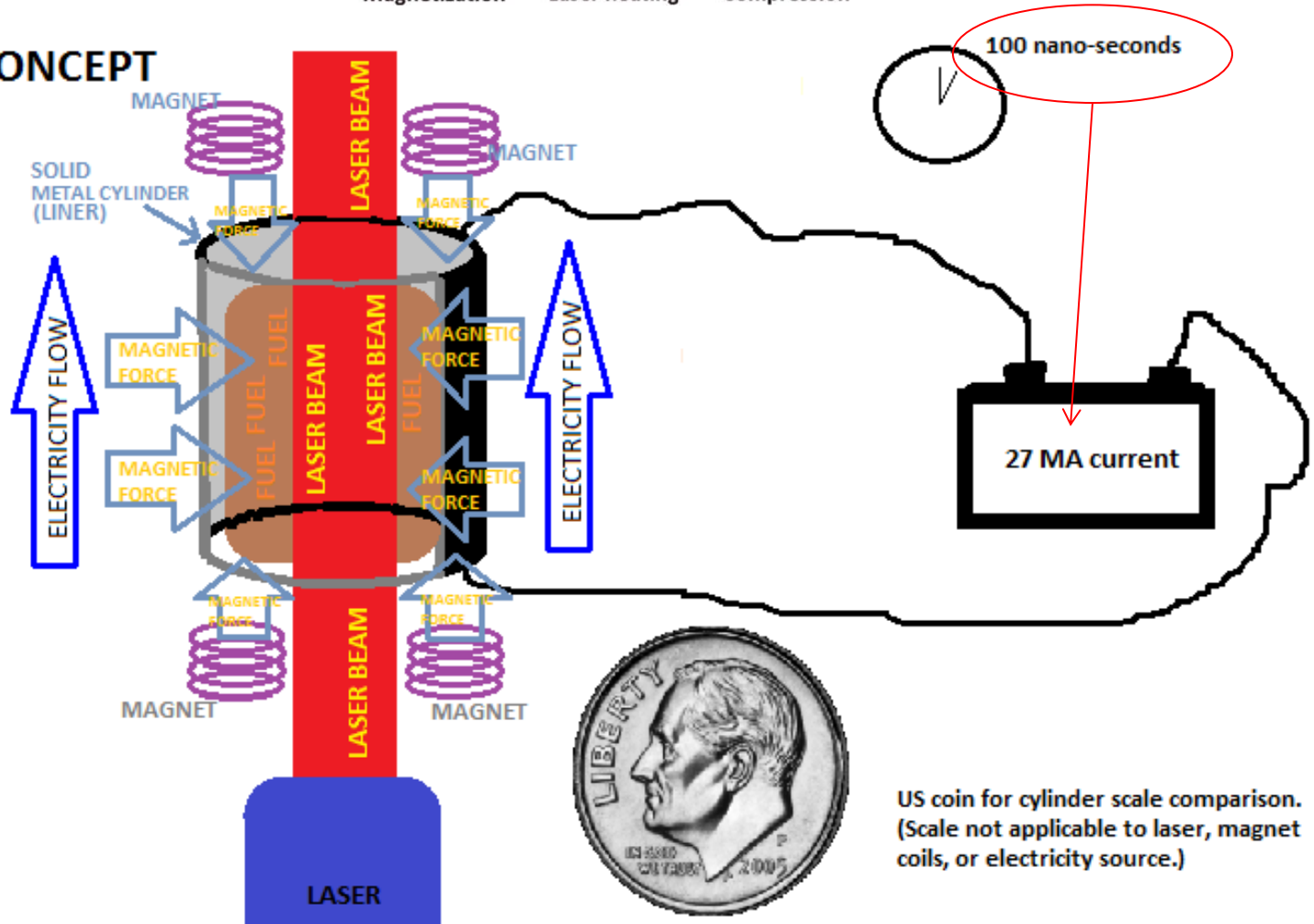
Target: Hohraum



Новый подход

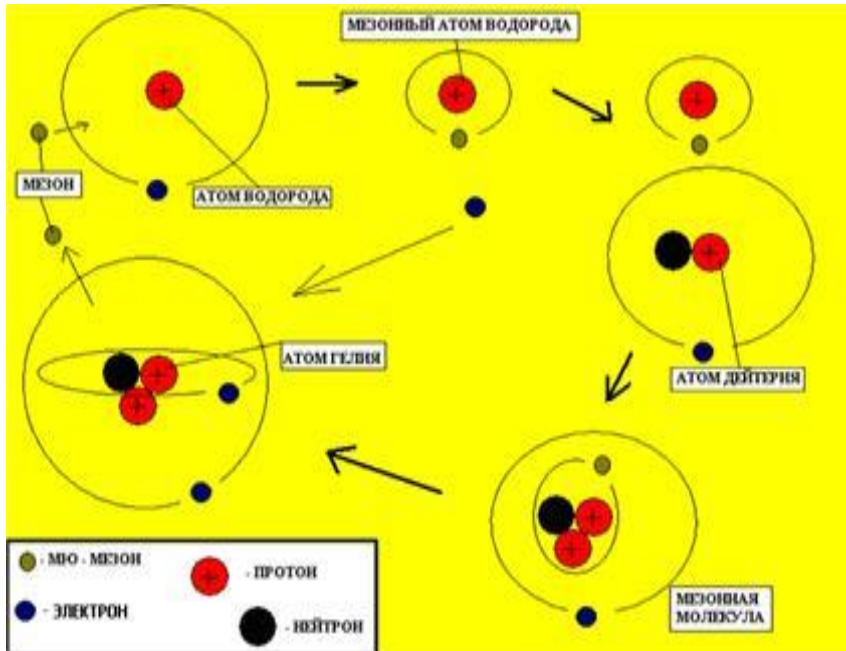


### MAGLIF CONCEPT



**3. Мюонный катализ** – отрицательно заряженный мюон ( $\tau_\mu=2,2 \cdot 10^{-6}$  с,  $m_\mu=206,769 m_e$ ), попадая в смесь изотопов водорода, образует там компактные мезоатомы  $p\mu$ ,  $d\mu$  и  $t\mu$ , которые, сталкиваясь затем с молекулами  $H_2$ ,  $D_2$  и  $T_2$ , образуют **мезомолекулярные ионы**  $(pp\mu)^+$ ,  $(pd\mu)^+$  и т. д.

В мезомолекулах ядра удалены на расстояние  $\sim 2a_\mu = 2h^2/m_\mu e^2 \sim 5 \cdot 10^{-11}$  см. На такое расстояние сближаются ядра изотопов водорода при кинетической энергии  $\sim 3$  кэВ, что соответствует  $\sim 30$  миллионам градусов, достигаемым в современных термоядерных установках. Ядра мезомолекул  $dd\mu$ ,  $dt\mu$  и  $tt\mu$  **сливаются** за время  $\tau = 10^{-9} — 10^{-12}$  с за счёт сильного взаимодействия.



Проблема практической реализации – короткое время жизни мюона:

**энергия, затраченная на создание мюона, не успевает окупиться!**

Frank, F.C. (1947). "Hypothetical Alternative Energy Sources for the 'Second Meson' Events". *Nature* **160** (4068): 525.

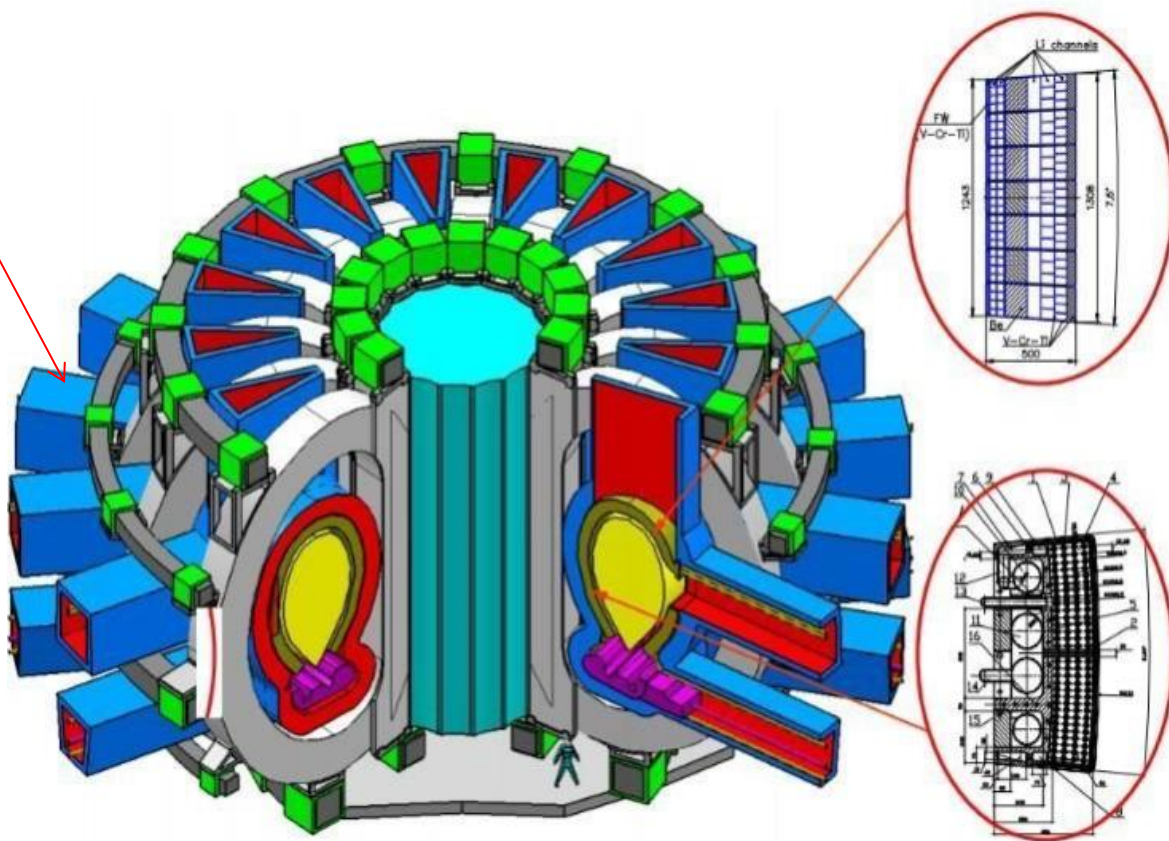
**4. Гибридный реактор** – гипотетическая установка *с термоядерным реактором* в качестве “ядра”, производящего интенсивный поток нейтронов, вызывающий *ядерные реакции деления* в оболочке (**бланкет**)

Термоядерные нейтроны, рождающиеся в плазме с энергией 14,1 МэВ, проникают через первую стенку в **бланкет** с делящимися веществами.

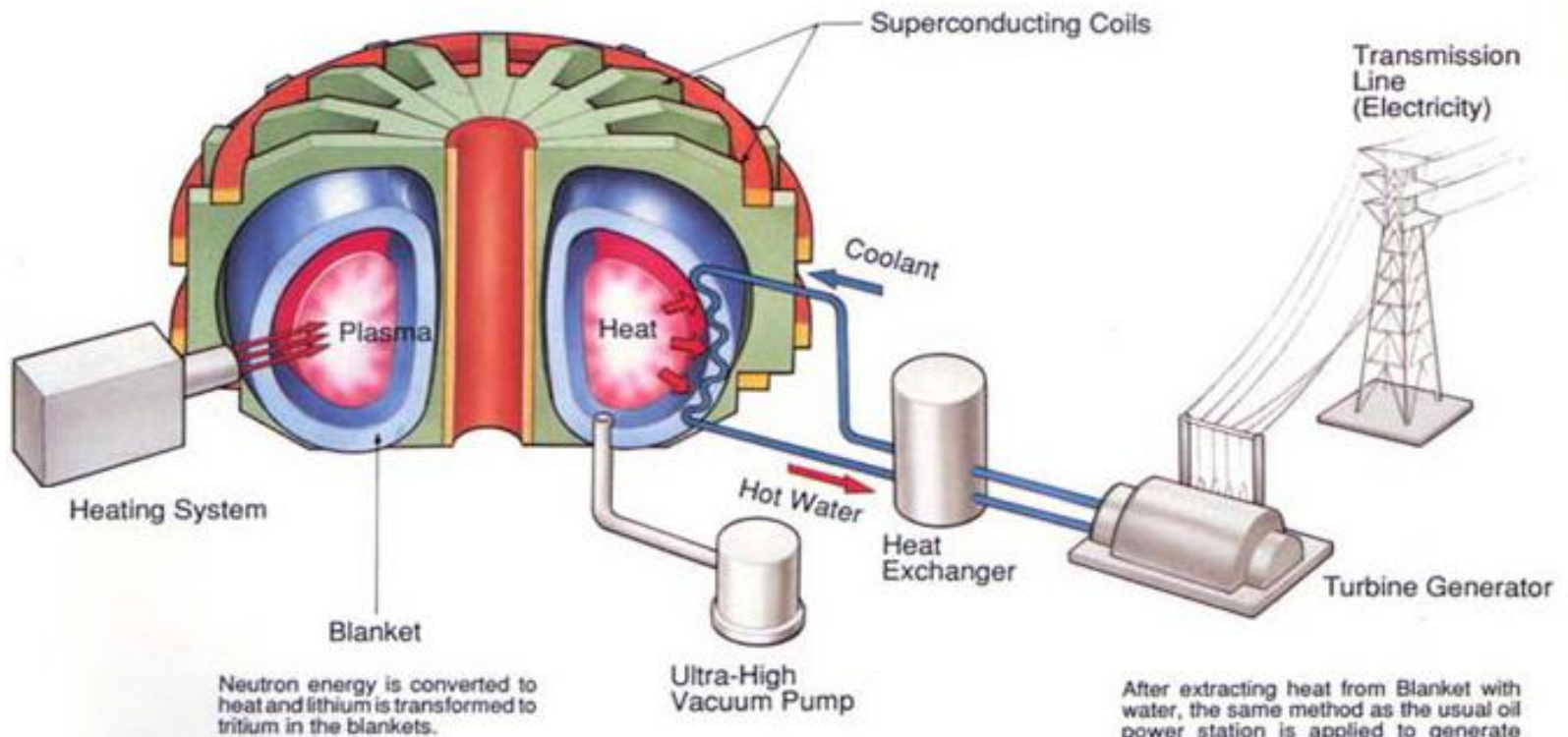
В бланкете нейтроны поглощаются  $^{238}\text{U}$  с образованием  $^{239}\text{Pu}$ ; если в эту зону поместить  $^{232}\text{Th}$ , то образуется  $^{233}\text{U}$ .

В бланкете выделяется энергия ~140 МэВ на один термоядерный нейтрон.

Тепловая энергия выносятся из бланкета теплоносителем



# Fusion Power Station



## **Вместо Заключения:**



*"We say that we will put the sun into a box. The idea is pretty.  
The problem is, we don't know how to make the box."*

*Pierre-Gilles de Gennes  
Nobel laureate in Physics 1991*

## Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Глава XIII
2. K.S. Krane. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, 1988. Chapter 14.
3. И.Н. Бекман. Ядерная физика. Лекция 21. Ядерные реакции в термоядерном синтезе, <http://profbeckman.narod.ru/YadFiz.files/L21.pdf>