

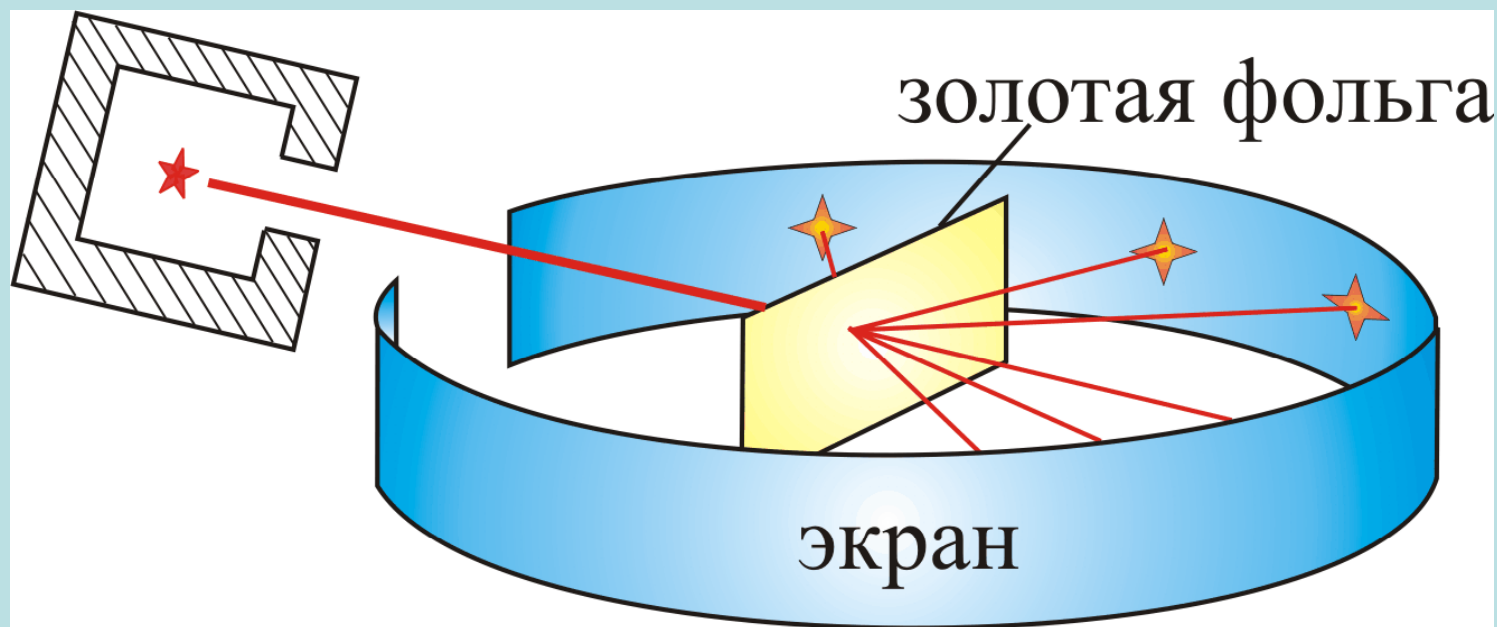
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Заряд, масса, размер и состав атомного ядра

Ядерная модель атома (модель Резерфорда).

Скорость α – частиц = 10^7 м/с = 10^4 км/сек.

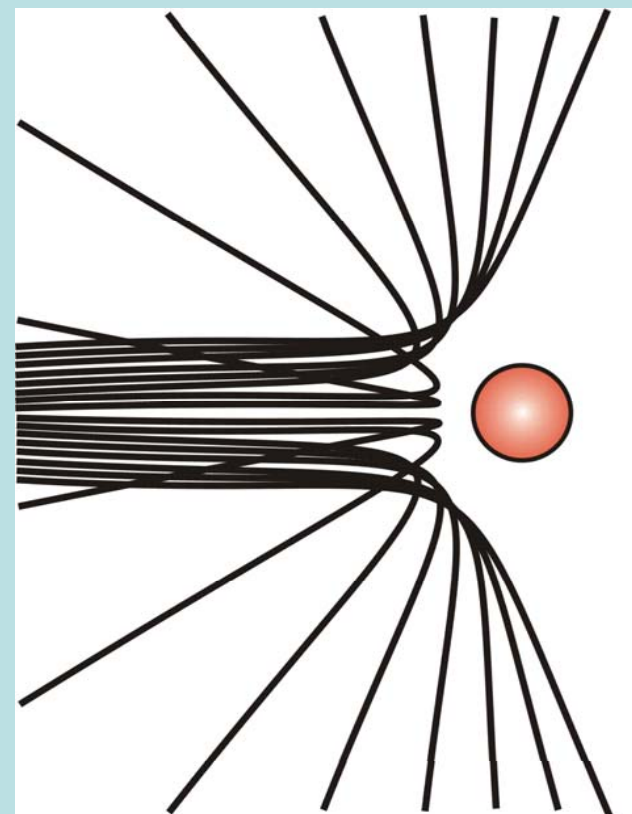
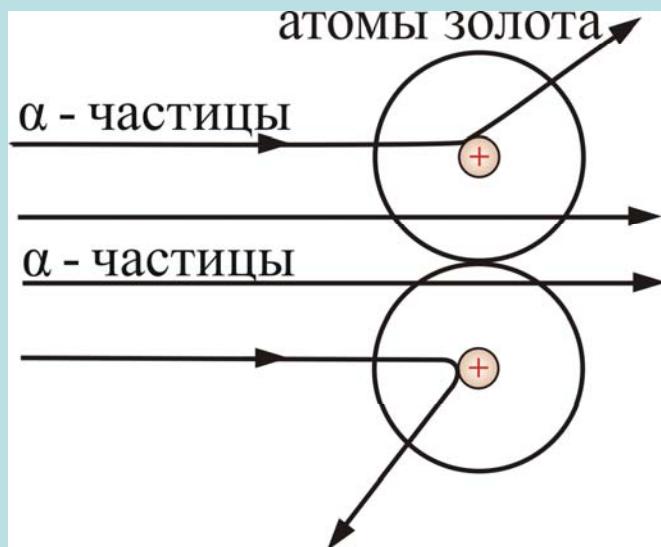
α – частица имеет положительный заряд равный $+2e$.



Рассеянные частицы ударялись об экран из сернистого цинка, вызывая **сцинтилляции** – вспышки света.

Количество вспышек в темноте фиксировалось через микроскоп

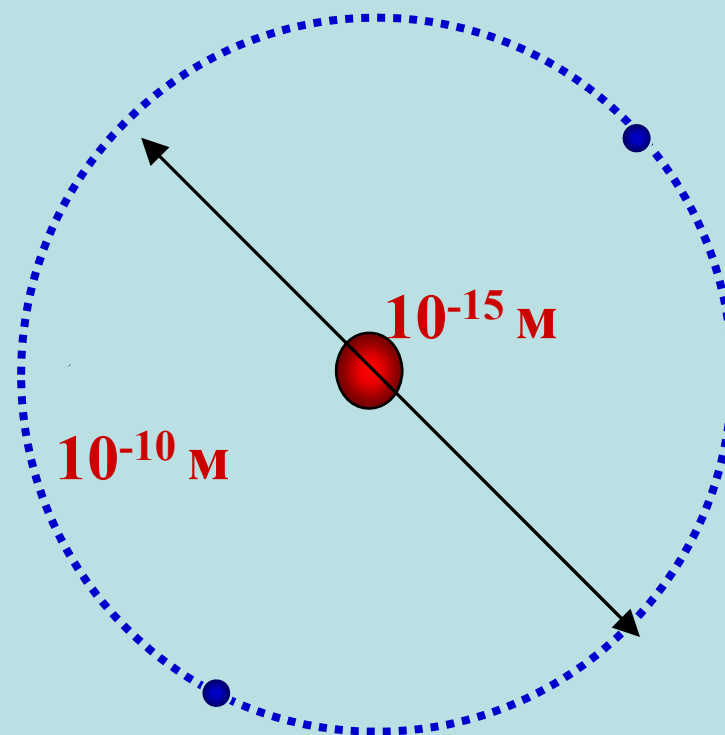
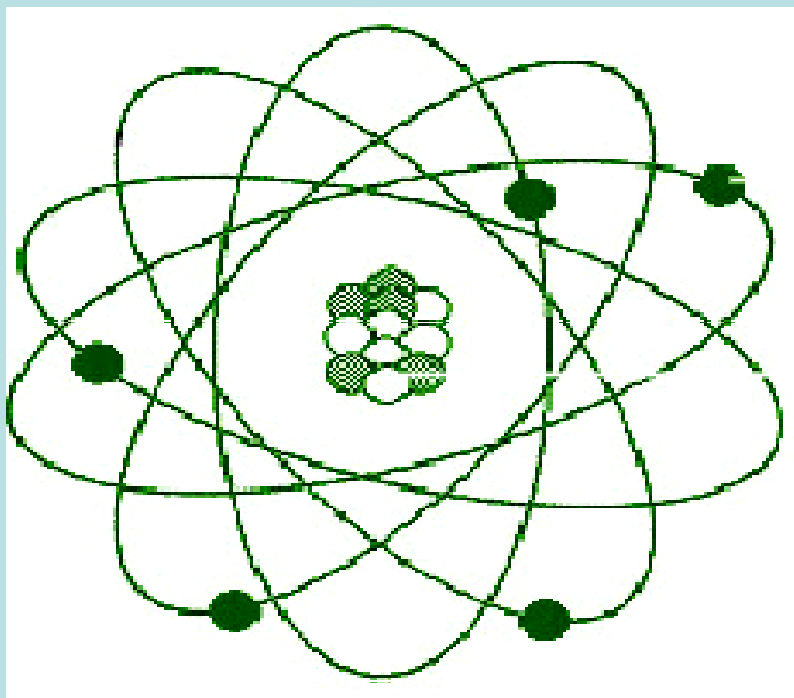
Большинство α -частиц рассеивалось на углы порядка 3°
Отдельные α -частицы отклонялись на большие углы, до 150° (одна из нескольких тысяч)



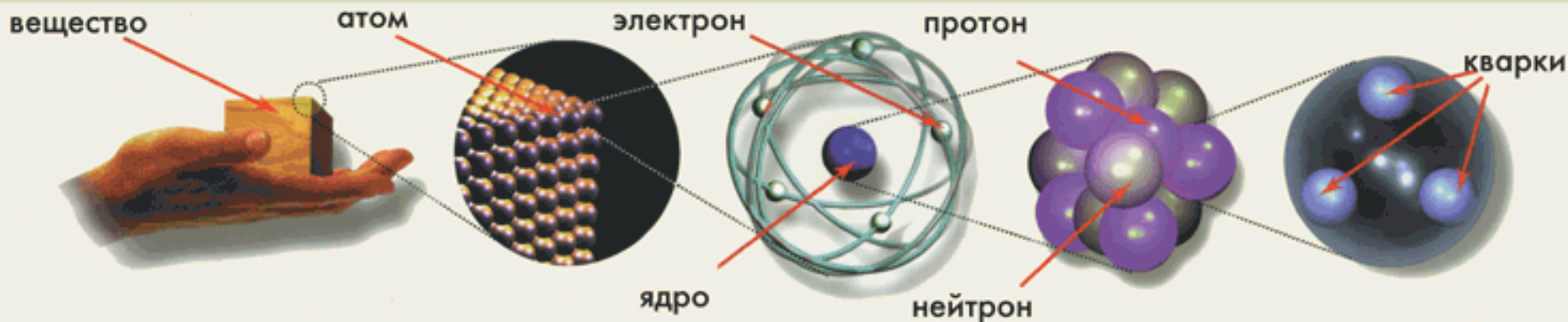
Такое отклонение возможно лишь при взаимодействии практически точечного положительного заряда – **ядра атома** – с близко пролетающей **α -частицей**.

Малая вероятность отклонения на большие углы свидетельствует о малых размерах ядра:

99,95% массы атома сосредоточено в ядре.



Заряд, масса, размер и состав атомного ядра



Фундаментальные фермионы

Электрический заряд
Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.

Эти частицы существовали в первый момент после «Большого взрыва». Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц.

ЛЕПТОНЫ	
-1	0
<p>Электрон переносит электрический ток $M = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>Электронное нейтрино играет фундаментальную роль при горении солнца, каждую секунду сквозь вас пролетают миллиарды этих частиц</p> 
<p>Мюон аналог электрона, время жизни - 2 микросекунды $M = 106 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>Мюонное нейтрино образуется при рождении и распаде мюонов $M < 0.2 \text{ МэВ}/c^2$</p> 
<p>Тау аналог электрона, время жизни - 3×10^{-13} $M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>Тау нейтрино образуется при рождении и распаде тау лептонов, открыто в 1975 г. $M < 20 \text{ МэВ}/c^2$</p> 

КВАРКИ

КВАРКИ	
+2/3	-1/3
<p>u-кварк входит в состав протонов и нейтронов $M = 3 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>d-кварк входит в состав протонов и нейтронов $M = 6 \text{ МэВ}/c^2$</p> 
<p>s-кварк (очарованный) открыт в 1974 г. $M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>z-кварк (странный) открыт в 1964 г. $M = 100 \text{ МэВ}/c^2$</p> 
<p>t-кварк открыт в 1995 г. $M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$</p> 	<p>b-кварк (прелестный) открыт в 1977 г. $M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$</p> 

Кванты фундаментальных полей

<p>Глюоны кванты сильных взаимодействий</p> 	<p>Фотоны кванты электромагнитных полей</p> 
<p>Взаимодействуют: кварки и глюоны</p>	<p>Все заряженные частицы</p>
<p>Объекты: протон, нейтрон, атомные ядра, пи-мезон и др. мезоны</p>	<p>атомы, молекулы</p>
<p>Процессы: деление и синтез атомных ядер</p>	<p>электричество, магнетизм, распространение света, радиоволны</p>

Промежуточные векторные бозоны кванты слабых взаимодействий

<p>W^- W^+ Z^0</p> 	<p>кварки, лептоны, промежуточные бозоны</p> 
<p>бета-распад ядер, распад нейтрона и мюона</p>	

Гравитоны кванты гравитации

	
<p>все частицы</p>	
<p>солнечная система, галактики, черные дыры</p>	
<p>притяжение тел</p>	

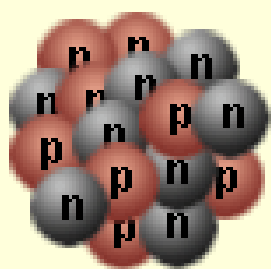
В состав атомного ядра входят элементарные частицы: протоны и нейтроны (нуклоны)

Протон имеет положительный заряд

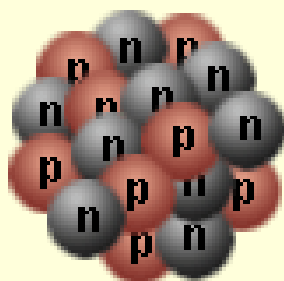
$$e^+ = 1,06 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

и массу покоя

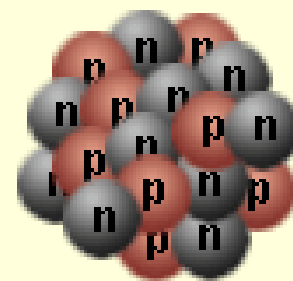
$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 m_e.$$



${}^1_8\text{O}$



${}^{17}_8\text{O}$



${}^{18}_8\text{O}$

Заряд ядра равен Ze ,
где e – заряд протона, Z – **зарядовое число**, равное **порядковому номеру** химического элемента в периодической системе элементов Менделеева, т.е. числу протонов в ядре.

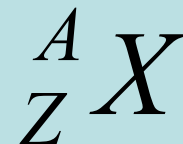
В настоящее время известны ядра с

$$Z = 1 \quad \text{до} \quad Z = 107 - 118$$

$A = Z + N$ называется **массовым числом**.

Ядра с одинаковым Z , но различными A называются **изотопами**.

Ядра, которые при одинаковом A имеют разные Z называются **изобарами**.



ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

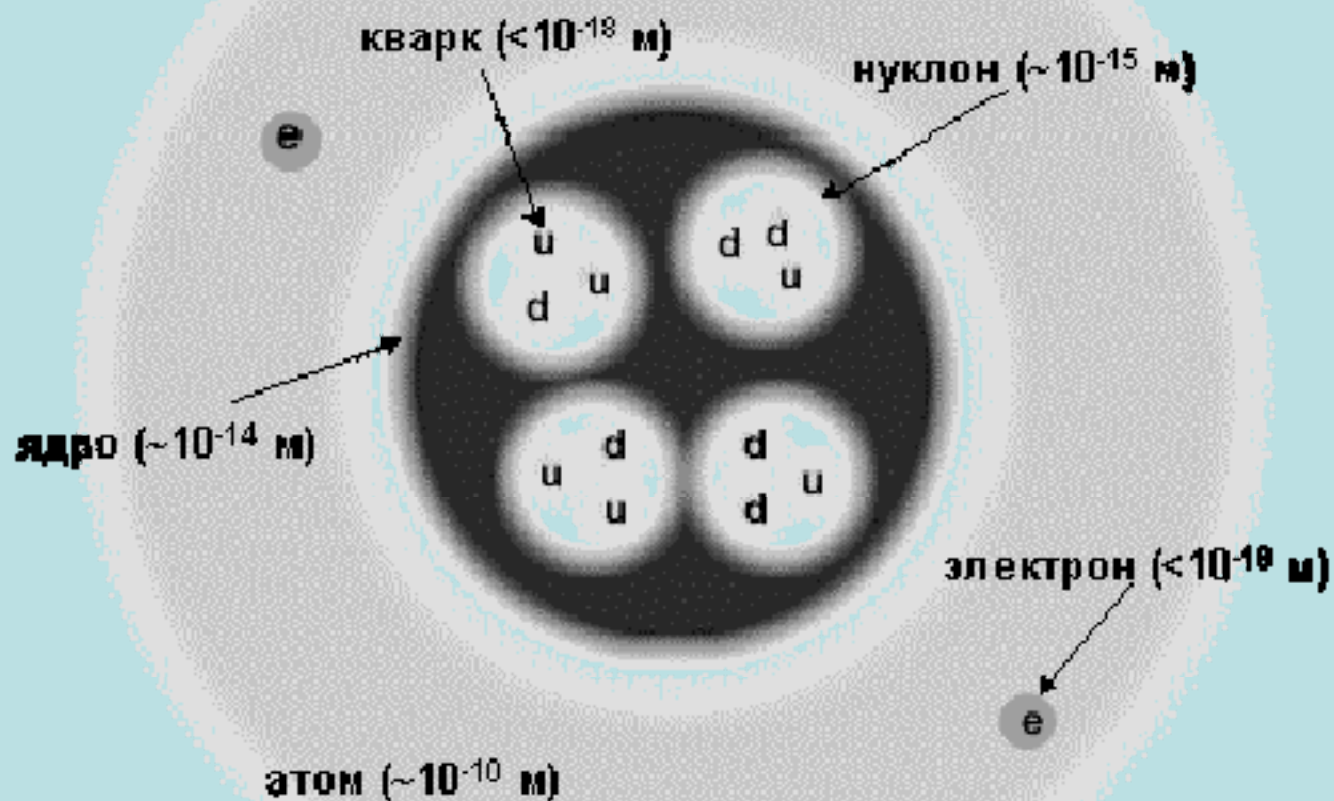
ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы								Э Л Е М Е Н Т О В							
	I	II		III	IV	V	VI	VII	VIII							
1	H 1 1,008							(H)						2 4,003 He		
2	Li 3 6,94	Be 4 9,01	B 5 10,81	C 6 12,01	N 7 14,01	O 8 16,0	F 9 19,0							10 20,18 Ne		
3	Na 11 22,99	Mg 12 24,3	Al 13 26,98	Si 14 28,09	P 15 30,97	S 16 32,06	Cl 17 35,45							18 39,95 Ar		
4	K 19 39,10	Ca 20 40,1	Sc 21 44,96	Ti 22 47,9	V 23 50,9	Cr 24 52,0	Mn 25 54,94	Fe 26 55,85	Co 27 58,93	Ni 28 58,71						
	Cu 29 63,55	Zn 30 65,4	Ga 31 69,7	Ge 32 72,59	As 33 74,92	Se 34 78,96	Br 35 79,9							36 83,80 Kr		
5	Rb 37 85,47	Sr 38 87,6	Y 39 88,9	Zr 40 91,2	Nb 41 92,9	Mo 42 95,94	Tc 43 (99)	Ru 44 101,1	Rh 45 102,9	Pd 46 106,4						
	Ag 47 107,9	Cd 48 112,4	In 49 114,8	Sn 50 118,7	Sb 51 121,75	Te 52 127,6	I 53 126,9							54 131,3 Xe		
6	Cs 55 132,9	Ba 56 137,3	* La 57 138,9	Hf 72 178,5	Ta 73 180,9	W 74 183,8	Re 75 186,2	Os 76 190,2	Ir 77 192,2	Pt 78 195,1						
	Au 79 196,9	Hg 80 200,6	Tl 81 204,4	Pb 82 207,2	Bi 83 208,9	Po 84 (210)	At 85 (210)							86 (222) Rn		
7	Fr 87 (223)	Ra 88 (226)	** Ac 89 (227)	Rf 104 (261)	Db 105 (262)	Sg 106 (263)	Bh 107 (264)	Hs 108 (265)	Mt 109 (266)							

* ЛАНТАНОИДЫ

** АКТИНОИДЫ

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- 1). Капельная модель ядра
- 2). Ободочечная модель ядра



$$R = R_0 A^{1/3} \quad \text{где } R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Плотность ядерного вещества составляет
 10^{17} кг/м^3

Протоны и нейтроны являются фермионами, так как имеют спин $\hbar/2$.

Ядро атома имеет собственный момент импульса – **спин ядра**, который квантуется по закону

$$L_{\text{яд}} = \hbar \sqrt{I(I + 1)}$$

I – внутреннее (полное) спиновое квантовое число.

Помимо спина ядро обладает **магнитным моментом** $P_{m_{\text{яд}}}$

Единицей измерения магнитных моментов ядер служит ядерный магнетон $\mu_{\text{яд}}$:

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

Ядерный магнетон в $m_p/m_e = 1836,5$ раз меньше магнетона Бора, откуда следует, что магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.

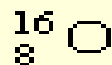
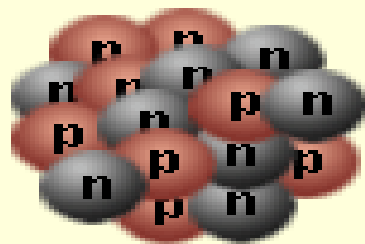
$$P_{m_{\text{яд}}} = \gamma_{\text{яд}} L_{\text{яд}}$$

$\gamma_{\text{яд}}$ – ядерное гиромагнитное отношение.

Квадрупольный электрический момент ядра Q

Q определяется только формой ядра. Так, для эллипсоида вращения:

$$Q = \frac{2}{5} Z_e (b^2 - a^2) \quad (5)$$



Энергия связи ядер. Дефект массы

Энергия связи ядер. Дефект массы

Ядерное сильное взаимодействие – притяжение – обеспечивающее устойчивость ядер несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.

Энергия связи ядра определяется величиной той работы, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.

$W_{\text{св}}$ – величина энергии, выделяющейся при образовании ядра,
соответствующая ей масса Δm , равна:

$$\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2} \quad (6)$$

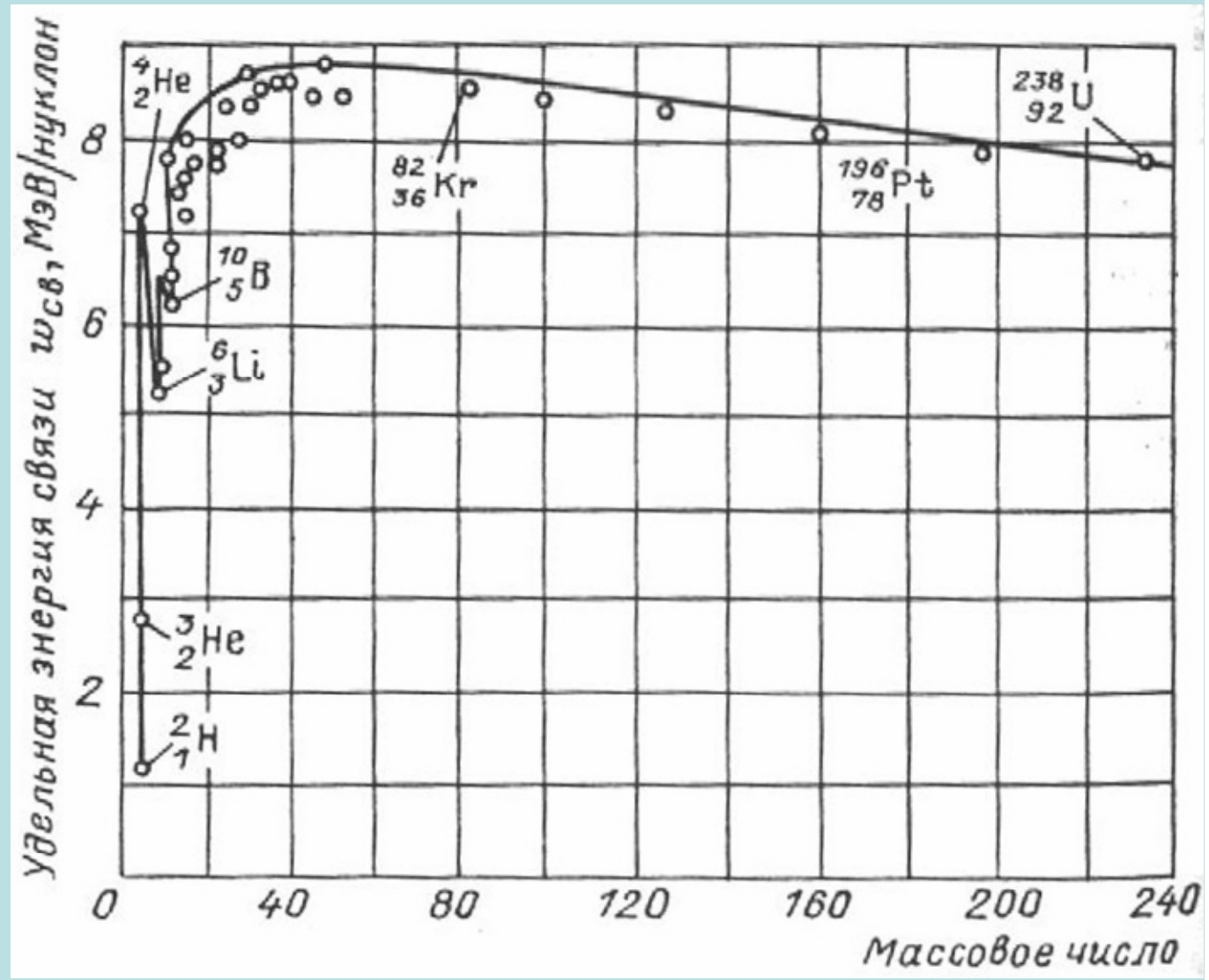
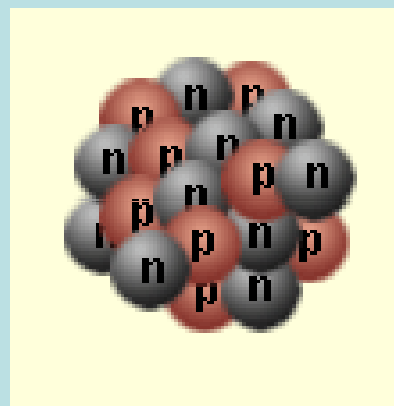
называется **дефектом масс**.

Если ядро массой $M_{\text{яд}}$ образовано из Z протонов с массой m_p и из $(A - Z)$ нейтронов с массой m_n , то

$$\Delta m = \left[Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}} \right] c^2 \quad (7)$$

Удельной энергией связи ядра $\omega_{\text{св}}$ называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}$$



Наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра средней части таблицы Менделеева. Тяжелые и легкие ядра менее устойчивы. Это означает, что энергетически выгодны следующие процессы:

- 1) деление тяжелых ядер на более легкие (реакции деления);
- 2) слияние легких ядер друг с другом в более тяжелые (термоядерные реакции).

При обоих процессах выделяется огромное количество энергии.

Если ядро имеет наименьшую возможную энергию

$$W_{\min} = -W_{\text{св}},$$

то оно находится **в основном энергетическом состоянии.**

Если ядро имеет энергию

$$W > W_{\min},$$

то оно находится в **возбужденном энергетическом состоянии.**

Случай $W = 0$ соответствует **расщеплению ядра на составляющие его нуклоны.**

Ядерные силы

Ядерные силы

Ядерные силы являются короткодействующими силами и относятся к классу так называемых сильных взаимодействий. Они проявляются лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами в ядре 10^{-15} м.

- Расстояние $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-15}$ м называется радиусом действия ядерных сил.

Свойства ядерных сил

- Ядерные силы обнаруживают **зарядовую независимость**: притяжение между двумя нуклонами одинаково независимо от зарядового состояния нуклонов — протонного или нейтронного.

Свойства ядерных сил

- **Ядерные силы обладают свойством насыщения**, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре (если не учитывать легкие ядра) при увеличении числа нуклонов не растет, а остается приблизительно постоянной.

Свойства ядерных сил

- Ядерные силы **зависят от ориентации спинов** взаимодействующих нуклонов.

Например, протон и нейтрон образуют дейтрон (ядро дейтерия) только при условии параллельной ориентации их спинов;

Свойства ядерных сил

- Ядерные силы не являются центральными, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Радиоактивность

Радиоактивность

Радиоактивностью называется превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

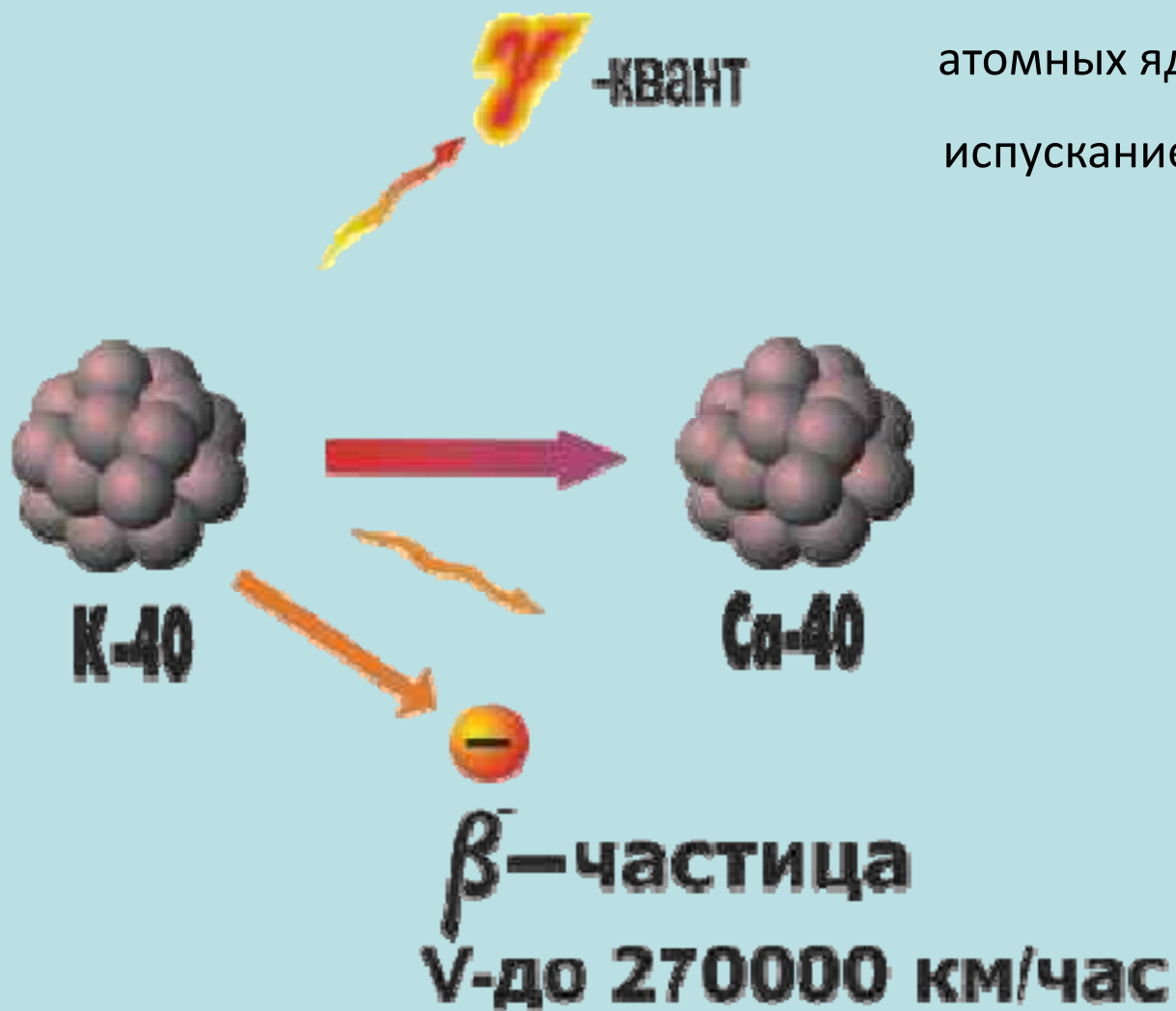
Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

Радиоактивность

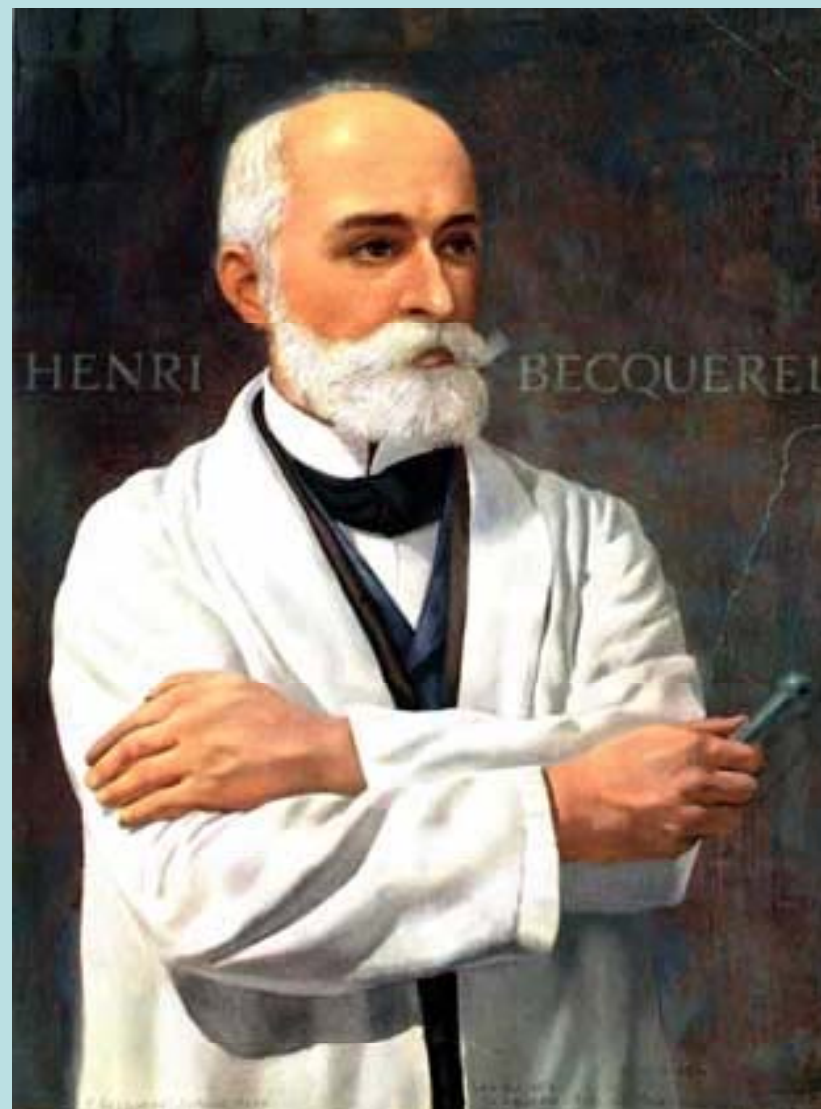
Радиоактивность –

самопроизвольные превращения
атомных ядер, сопровождающиеся
испусканием элементарных частиц
или более лёгких ядер.



Открытие

В 1896 г. Беккерель случайно открыл радиоактивность. Исследуя работу Рентгена, он завернул флюоресцирующий материал в непрозрачную бумагу вместе с фотопластинками и обнаружил, что через некоторое время фотопластинки были полностью засвечены.

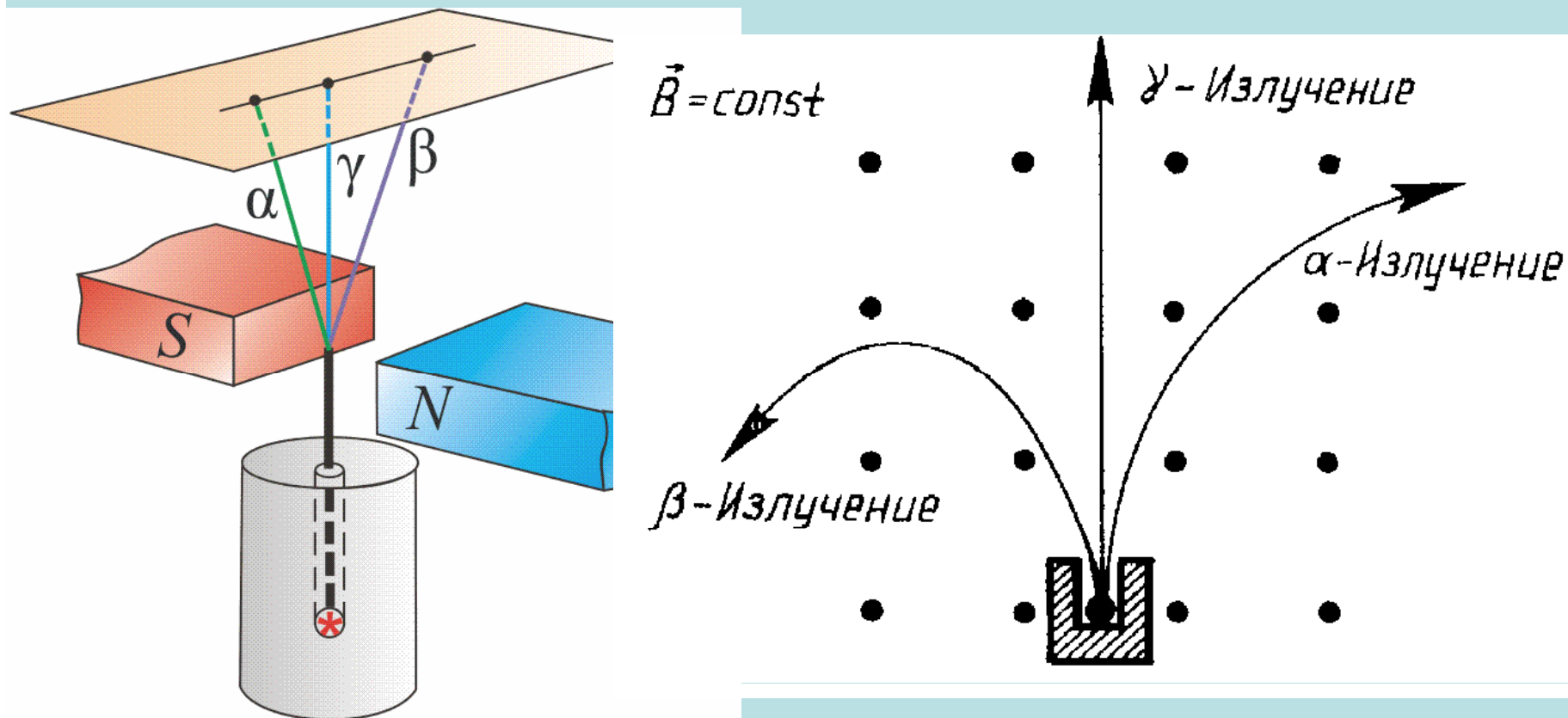


Антуан Анри Беккерель

Радиоактивные процессы:

- α – излучение (ядра гелия)
- β – излучение (поток быстрых электронов)
- γ – излучение (коротковолновое электромагнитное излучение)
- спонтанное деление тяжелых ядер
- протонная радиоактивность

Поведение разных типов радиоактивного излучения в магнитном поле:



- Альфа-лучи отклоняются в ту же сторону, что и поток положительно заряженных частиц
- Бета-лучи – в противоположную сторону (как поток отрицательных частиц)
- Гамма-лучи никак не реагируют на действие магнитного поля

Тип радиоактивности	Изменение Заряда ядра Z	Изменение массового числа A	Характер процесса
Альфа-распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет α -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
Бета-распад	$Z \pm 1$	A	Взаимные превращения в ядре нейтрона (1_0n) и протона (1_1p)
B_- – распад	$Z + 1$	A	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
B_+ – распад	$Z - 1$	A	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$
Электронный захват (e^- или К-захват)	$Z - 1$	A	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$ ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ – электронное нейтрино и антинейтрино. В скобках указаны частицы, вылетающие из ядра.
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	Деление ядра обычно на два осколка, имеющие приблизительно равные массы и заряды

Все типы радиоактивности сопровождаются испусканием гамма-излучения – жесткого, коротковолнового электромагнитного излучения.

Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется материнским; возникающее дочернее ядро, как правило, оказывается возбужденным, и его переход в основное состояние сопровождается испусканием γ -фотона.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda T}$$

N_0 – количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени $t = 0$,

N – число ядер в том же объеме к моменту времени t ,

λ – постоянная распада,

Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях:

- постоянная распада не зависит от внешних условий;
- число ядер, распадающихся за время dt , пропорционально начальному количеству ядер

Величина $1/\lambda = \tau$ – называется средней продолжительностью жизни (среднее время жизни τ) радиоактивного изотопа.

Средняя продолжительность τ жизни всех первоначально существовавших ядер

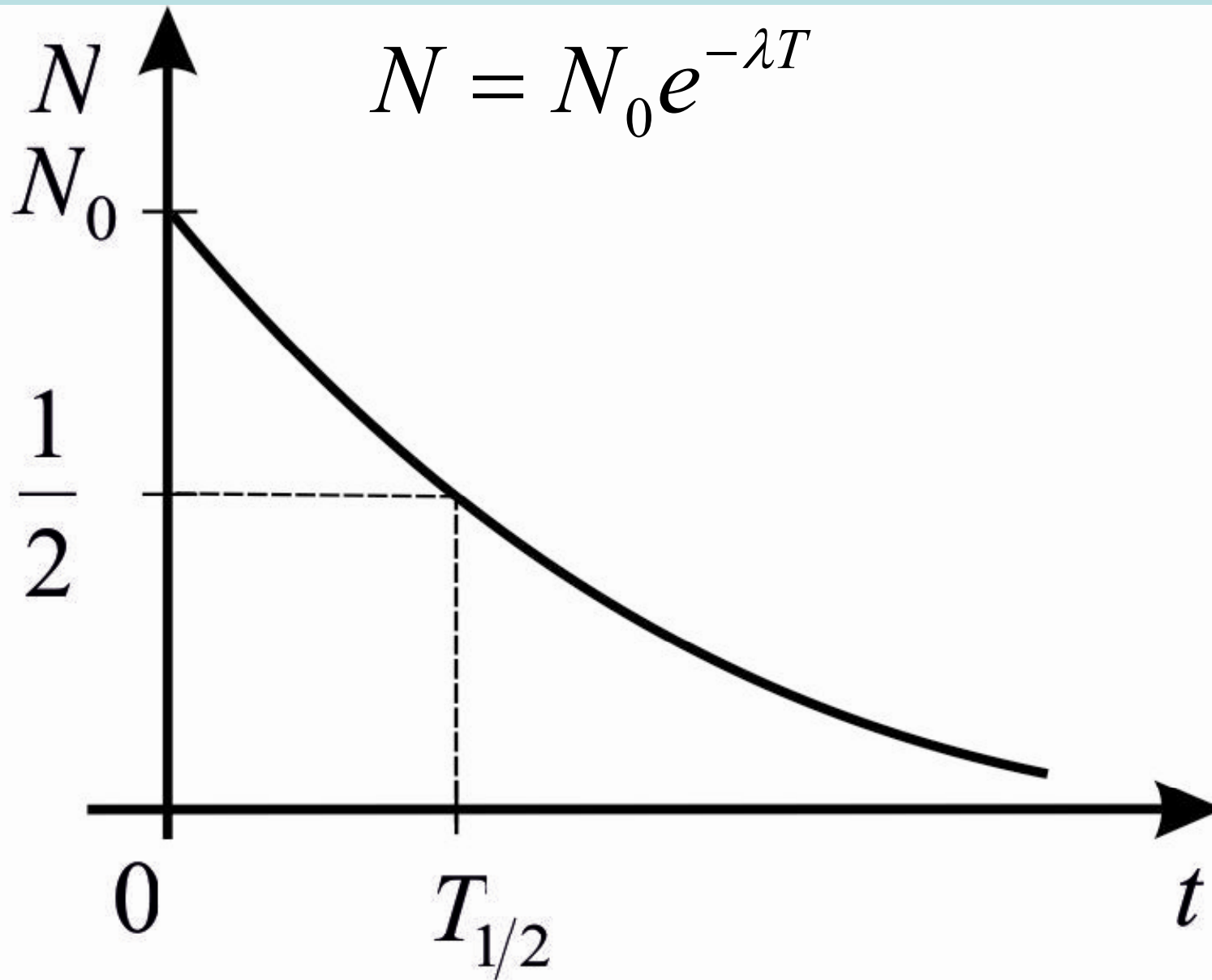
$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Характеристикой устойчивости ядер относительно распада служит период полураспада $T_{1/2}$.

Так называется время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества уменьшается наполовину.

Связь λ и $T_{1/2}$:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693\tau$$



Бывает, что дочерние ядра также радиоактивные и распадаются со скоростью, характеризуемой постоянной распада λ' .

Новый продукт распада также радиоактивный и т.д...

- образуется **радиоактивный ряд (семейство)**:
 ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U .

Активность радиоактивного препарата = λN

- число распадов в единицу времени.

Единица измерения активности - **беккерель (Бк)** =

1 распад в секунду.

Закон сохранения электрического заряда при радиоактивном распаде ядер:

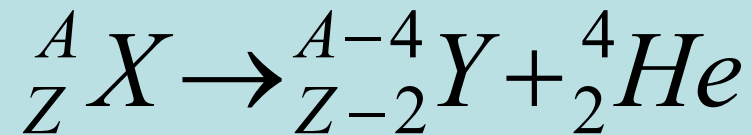
$$Z_{\text{яд}}e = \sum_i Z_i e$$

где $Z_{\text{яд}}e$ – заряд материнского ядра,
 $Z_i e$ – заряды ядер и частиц, возникших в результате радиоактивного распада.

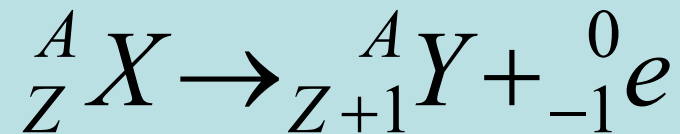
Правила смещения (правила Фаянса и Содди)

при радиоактивных α - и β_- – распадах:

при α - распаде



при β_- - распаде



Здесь ${}^A_Z X$ – материнское ядро,

Y – символ дочернего ядра,

${}^4_2 \text{He}$ – ядро гелия,

${}^0_{-1} e$ – символическое обозначение электрона,

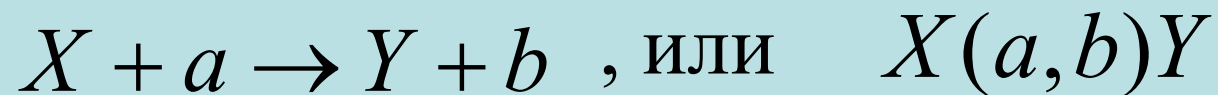
для которого $A = 0$ и $Z = -1$.

Ядерные реакции и их основные типы

Ядерные реакции и их основные типы

Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где X и Y – исходные и конечные ядра,
 a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В ядерной физике эффективность взаимодействия характеризуют эффективным сечением σ .

С каждым видом взаимодействия частицы с ядром связывают своё эффективное сечение:

- эффективное сечение расщепления определяет процесс расщепления;
- эффективное сечение поглощения – процессы поглощения.

Эффективное сечение ядерной реакции:

$$\sigma = dN / (nNdx)$$

где N – число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объёма n - ядер;

dN – число этих частиц, вступающих в реакцию в слое толщиной dx .

Эффективное сечение σ имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдёт реакция.

Единицы измерения эффективного сечения ядерных процессов – барн ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$).

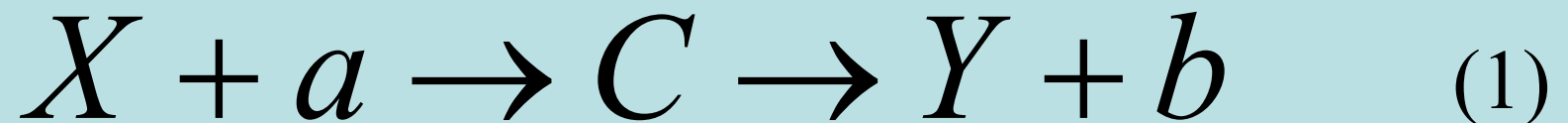
В любой ядерной реакции выполняются: законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.

Выполняются также

- законы сохранения энергии,
- импульса,
- момента импульса.

В отличие от радиоактивного распада, который всегда протекает с выделением энергии, ядерные распады могут быть как экзотермические (с выделением энергии), так и эндотермические (с поглощением энергии).

Важнейшую роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло предположение М. Бора (1936 г.) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:



Первая стадия – это захват ядром X частицы a , приблизившийся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м), и образование промежуточного ядра C , называемого составным (или компаунд – ядром).



Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в **возбуждённом состоянии**.

При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон или α -частица) может получить энергию, достаточную для вылета из ядра.

В результате наступает вторая стадия ядерной реакции – распад составного ядра на ядро Y и частицу b .

В ядерной физике вводится характерное **ядерное время** – время, необходимое для пролета частицей расстояния порядка величины равной диаметру ядра ($d \approx 10^{-15} \text{ м}$). Так для частицы с энергией 1 МэВ (что соответствует её скорости 10^7 м/с) характерное **ядерное время** $\tau \approx 10^{-22} \text{ с}$. С другой стороны доказано, что **время жизни составного ядра** $10^{-16} - 10^{-12} \text{ с}$, т.е. составляет $(10^6 - 10^{10})\tau$. Это означает, что **за время жизни составного ядра, может произойти очень много столкновений нуклонов между собой**, т.е. перераспределение энергии между нуклонами действительно возможно. Следовательно, составное ядро живет настолько долго, что полностью «забывает», каким образом оно образовалось. Поэтому **характер распада составного ядра** (испускаемые им частицы ν) – вторая стадия ядерной реакции – **не зависит от способа образования составного ядра** – первой стадии.

Если испущенная частица тождественна с захваченной ($b \equiv a$), то схема (1) описывает **рассеяние частицы**:

упругое – при $E_b = E_a$;

неупругое – при $E_b \neq E_a$.

Если же испущенная частица не тождественна с захваченной ($b \neq a$), то имеем сходство с ядерной реакцией в прямом смысле слова.

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями (например, реакция вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

1. по роду участвующих в них частиц

- реакции под действием нейтронов;
- реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц);
- реакции под действием γ -квантов;

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

2. по энергии вызывающих их частиц –

- **реакции при малых энергиях** (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов;
- **реакции при средних энергиях** (порядка до нескольких МэВ), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протон, α -частицы);
- **реакции происходящие при высоких энергиях** (сотни и тысячи МэВ), приводящие к образованию отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

3. по роду участвующих в них ядер – реакции на лёгких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжёлых ядрах ($A > 100$);

4. по характеру происходящих ядерных превращений –

- реакции с испусканием нейтронов;
- реакции с испусканием заряженных частиц;
- реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, испуская один или несколько γ -квантов).

Деление ядер

Деление ядер

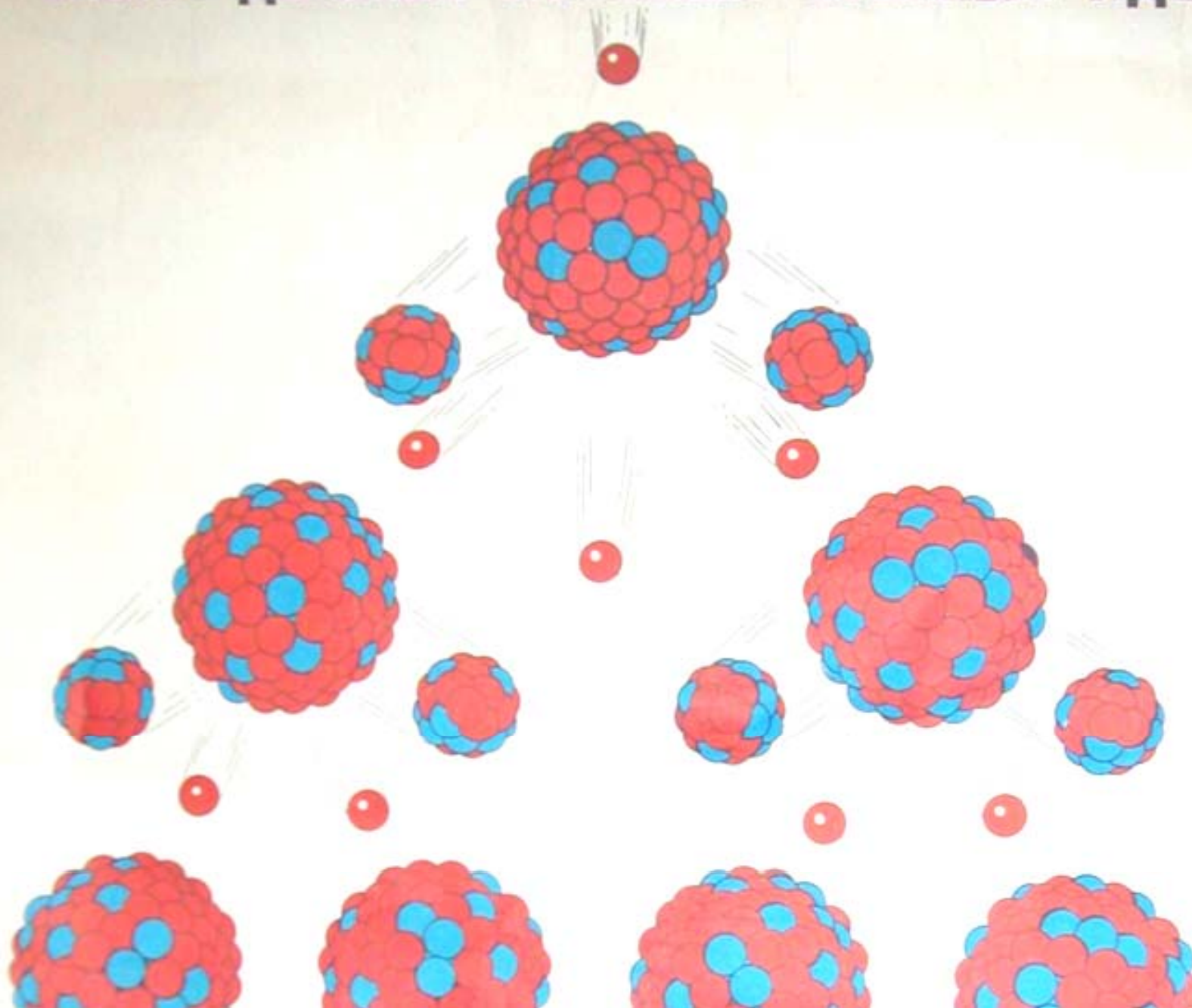
Задача была решена немецкими физиками Л. Мейтнер и О. Фришем, показавшими, что при поглощении нейтронов ураном происходит деление ядра на два осколка.



где $k > 1$.

При делении ядра урана тепловой нейтрон с энергией $\sim 0,1$ эВ высвобождает энергию ~ 200 МэВ.

СХЕМА ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АТОМНЫХ ЯДЕР



Используется цепная реакция деления
в двух направлениях:

- управляемая ядерная реакция деления –
создание атомных реакторов;
- неуправляемая ядерная реакция деления –
создание ядерного оружия.

В 1942 г. под руководством Э. Ферми в США
был построен первый ядерный реактор.

В СССР первый реактор был запущен в 1946 г.
под руководством И. Курчатова.

В 1954 г. в СССР была построена первая атомная
электростанция.

В ядерной физике рассматриваются два процесса: - синтез и деление ядер.

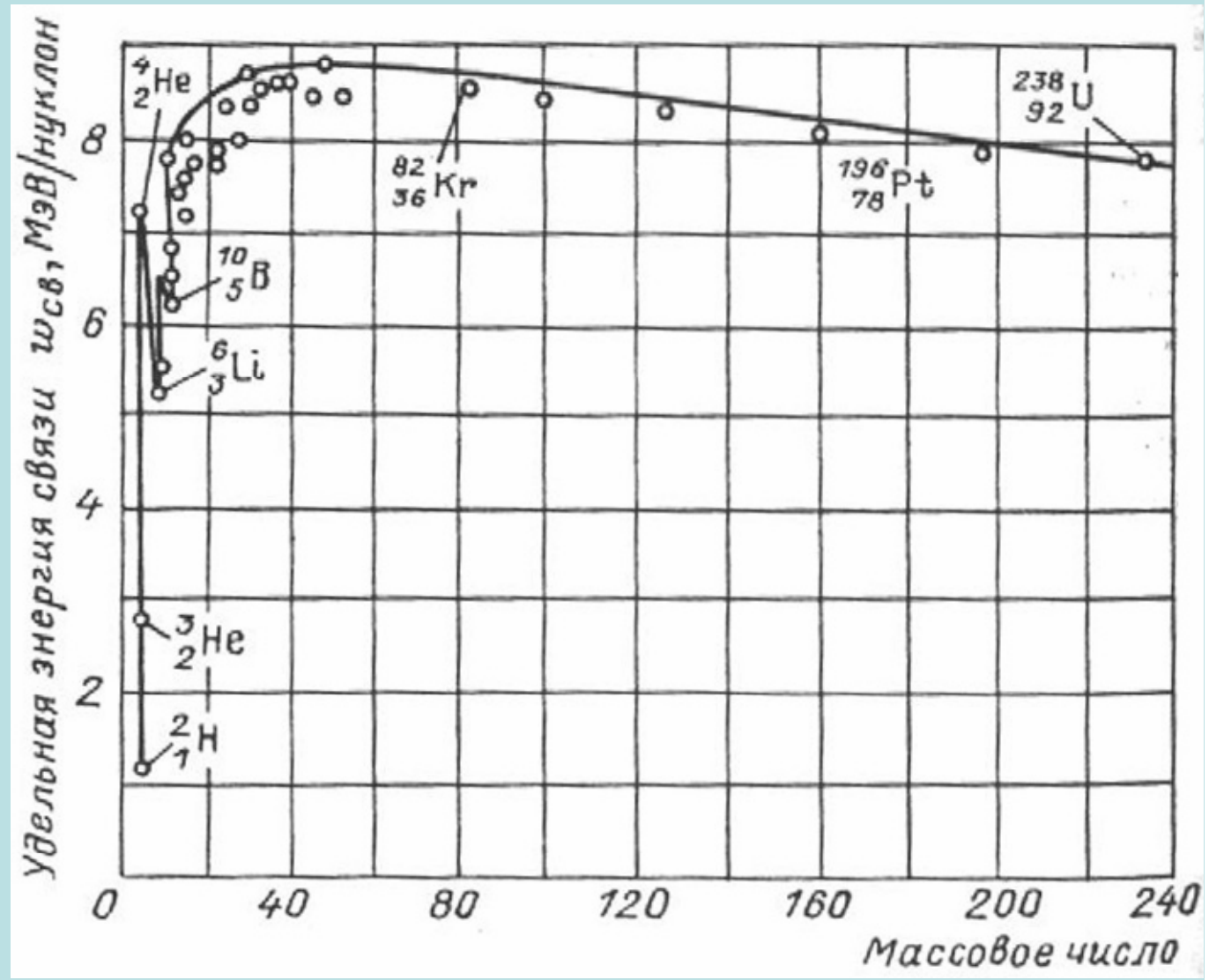
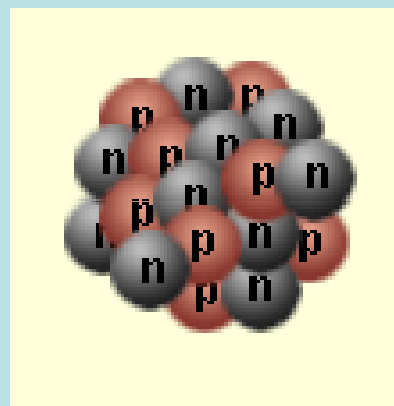
Если соединить два легких ядра, то масса суммарного ядра будет меньше суммы масс первоначальных ядер на ΔM (дефект масс).

При соединении легкие ядра сольются с выделением энергии ΔMc^2 . Этот процесс называется синтезом ядер. Разность масс может превышать 0,5%.

Энергия водородной бомбы — это энергия, выделяющаяся при ядерном синтезе.

Удельной энергией связи ядра $\omega_{\text{св}}$ называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

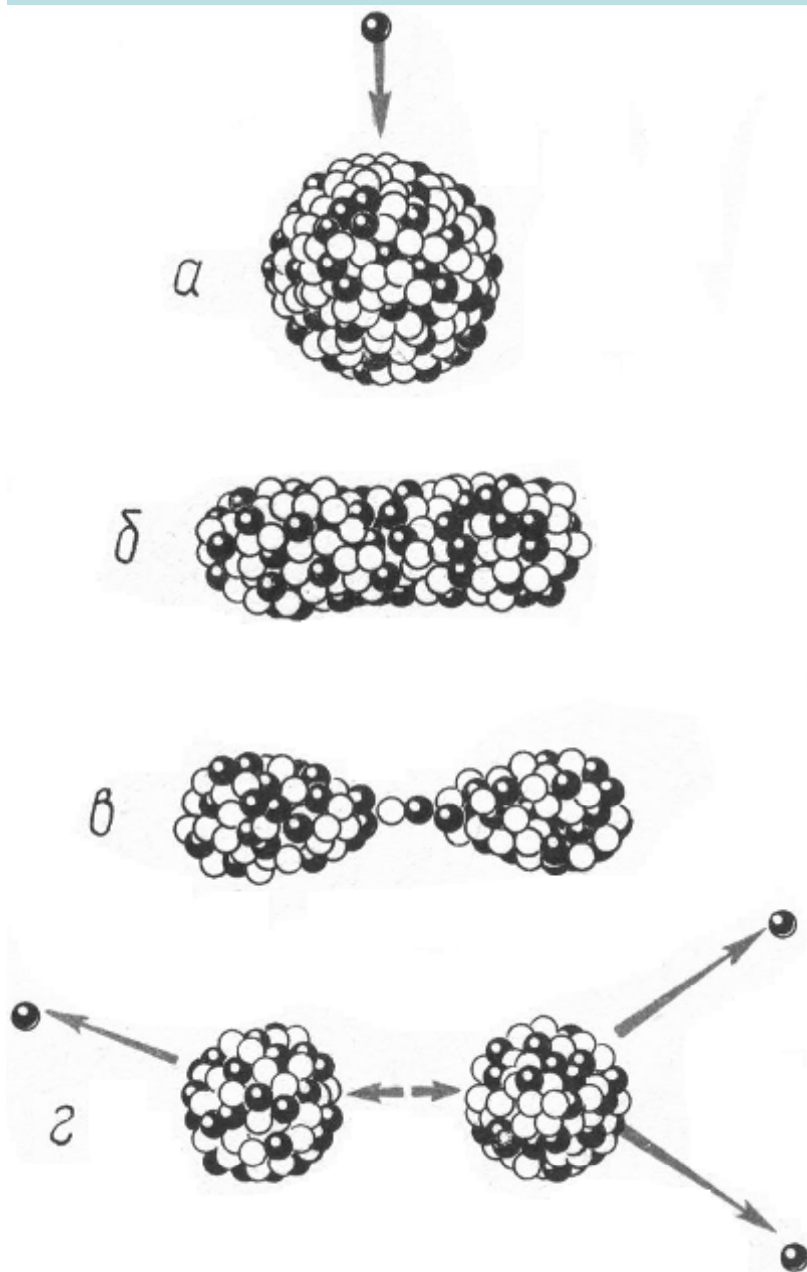
$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}$$



У тяжелых ядер существует тенденция к делению на два более легких ядра с выделением энергии.

Если расщепляется тяжелое ядро на два более легких ядра, то их масса будет меньше массы родительского ядра на порядка 0,1%.

Энергия атомной бомбы и ядерного реактора представляет собой энергию, высвобождающуюся при делении ядер.



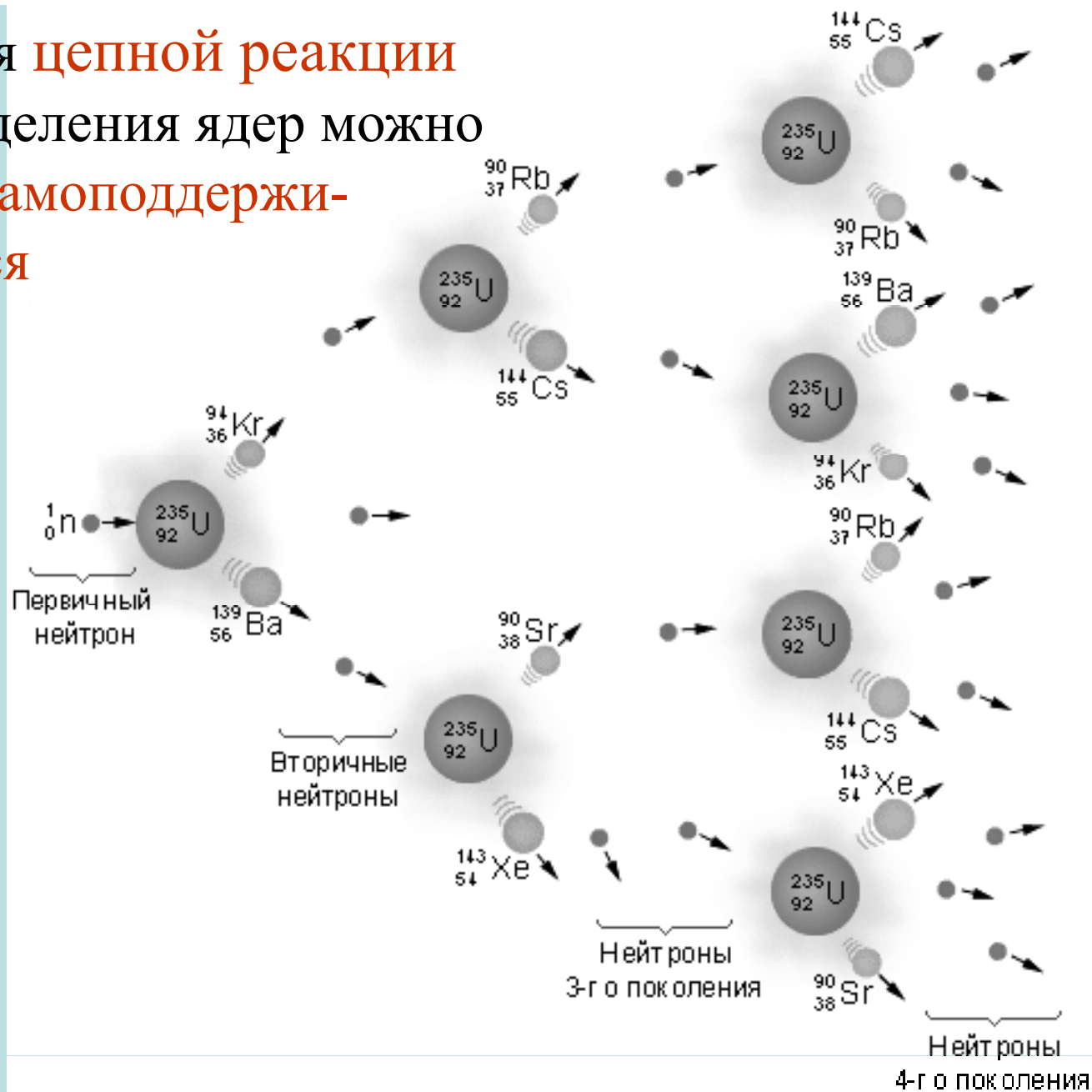
В процессе деления ядро изменяет форму — последовательно проходит через следующие стадии : шар, эллипсоид, гантель, два грушевидных осколка, два сферических осколка.

За один акт деления образуется более двух нейтронов деления со средней энергией ~ 2 МэВ.
В 1 г любого вещества содержится

$$mc^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$$

Деление 1 г урана сопровождается выделением $\sim 9 \cdot 10^{10}$ Дж. Это почти в 3 млн раз превосходит энергию сжигания 1 г угля ($2,9 \cdot 10^4$ Дж).

Благодаря **цепной реакции**
процесс деления ядер можно
сделать **самоподдерживающимся**



При каждом делении вылетают 2 или 3 нейтрона

При каждом делении вылетают 2 или 3 нейтрона. Если одному из этих нейтронов удастся вызвать деление другого ядра урана, то процесс будет **самоподдерживающимся**.

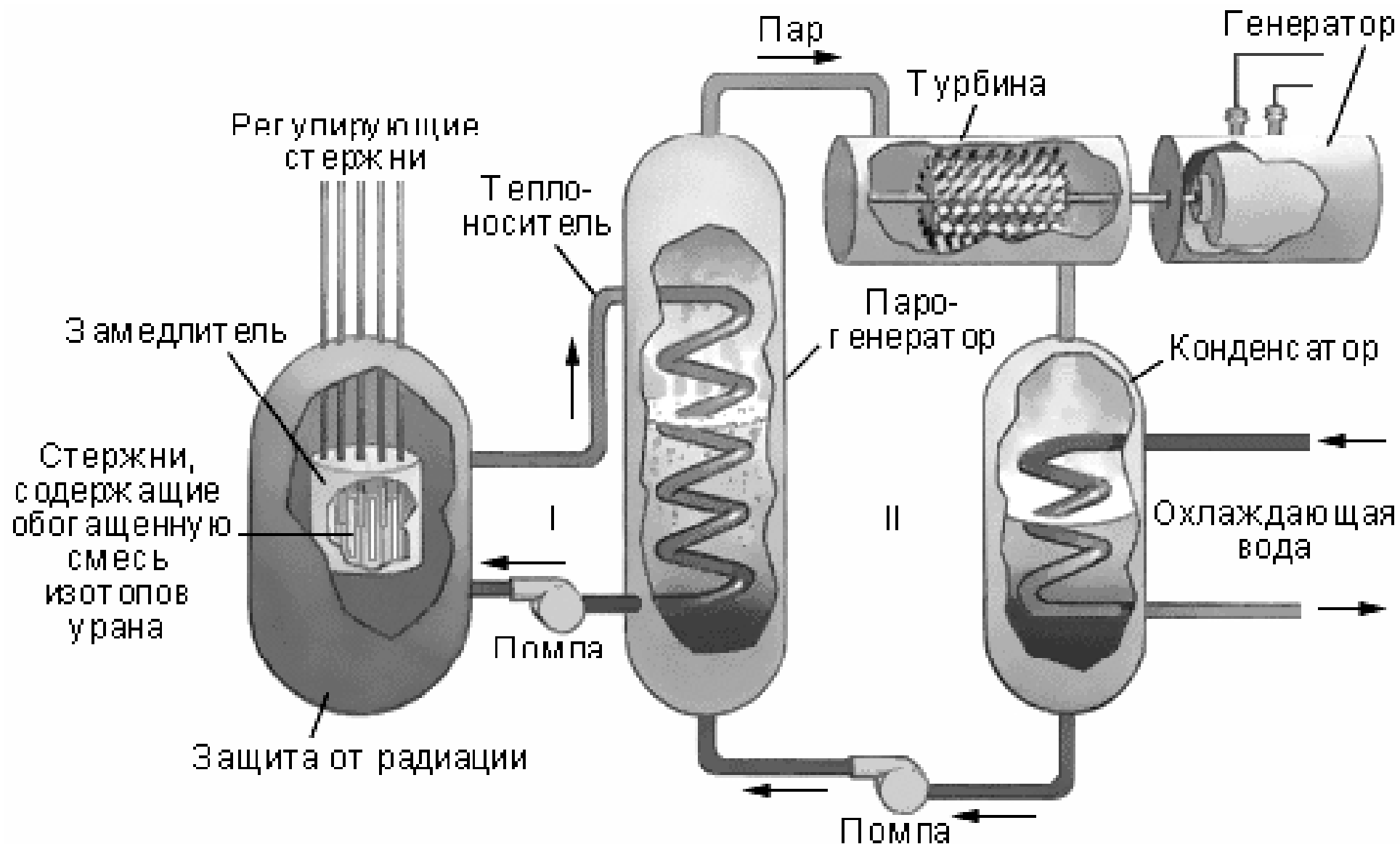
Совокупность делящегося вещества, удовлетворяющая этому требованию - **критическая сборка**.

Первая такая сборка, названная ядерным реактором, была построена в 1942 г. под руководством Энрико Ферми на территории Чикагского университета в США.

Первый ядерный реактор был запущен в 1946 г. под руководством И. Курчатова в Москве.

Первая атомная электростанция мощностью 5 МВт была пущена в СССР в 1954 г. в г. Обнинске





Первая атомная электростанция мощностью 5 МВт была построена пущена в СССР 27.6.1954 г. в г. Обнинске

Типы ядерных реакторов.

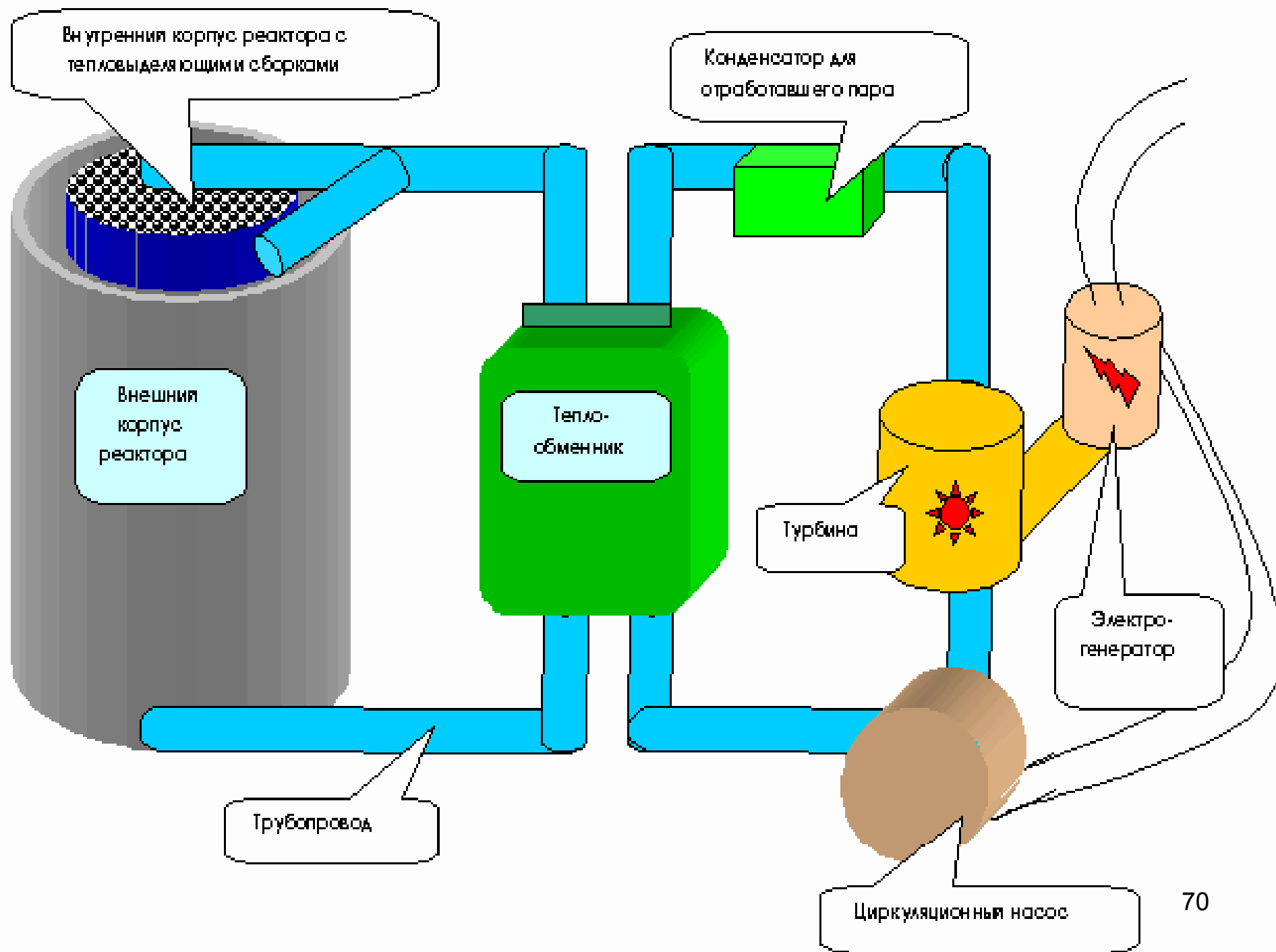
- Ядерным реактором называется устройство, в котором *осуществляется управляемая реакция деления ядер.*
- Система управления реактором состоит из набора стержней, состоящих из материала высокопоглощающего нейтроны.
- Стержни располагаются в специальных каналах и могут быть подняты или опущены в реактор.
- В поднятом состоянии они способствуют разгону реактора, в опущенном - заглушают его.

Основные элементы активной зоны реактора: ядерное топливо, замедлитель нейтронов, теплоноситель для отвода тепла и устройство для регулирования скорости реакции.



ВВЭР (Водо-Водяной Энергетический реактор)

- Реакторы ВВЭР являются самым распространенным типом реакторов в России. Весьма привлекательны дешевизна используемого в них теплоносителя-замедлителя и относительная безопасность в эксплуатации, несмотря на необходимость использования в этих реакторах обогащенного урана.
- Из самого названия реактора ВВЭР следует, что у него и замедлителем, и теплоносителем является обычная легкая вода. В качестве топлива используется обогащенный до 4.5% уран.



Он имеет два контура-1 реакторный, полностью изолирован от 2, что уменьшает радиоактивные выбросы в атмосферу.

Циркуляционные насосы прокачивают воду через реактор и теплообменник. Вода реакторного контура находится под повышенным давлением, так что несмотря на ее высокую температуру (293 градуса - на выходе, 267 - на входе в реактор) ее закипания не происходит.

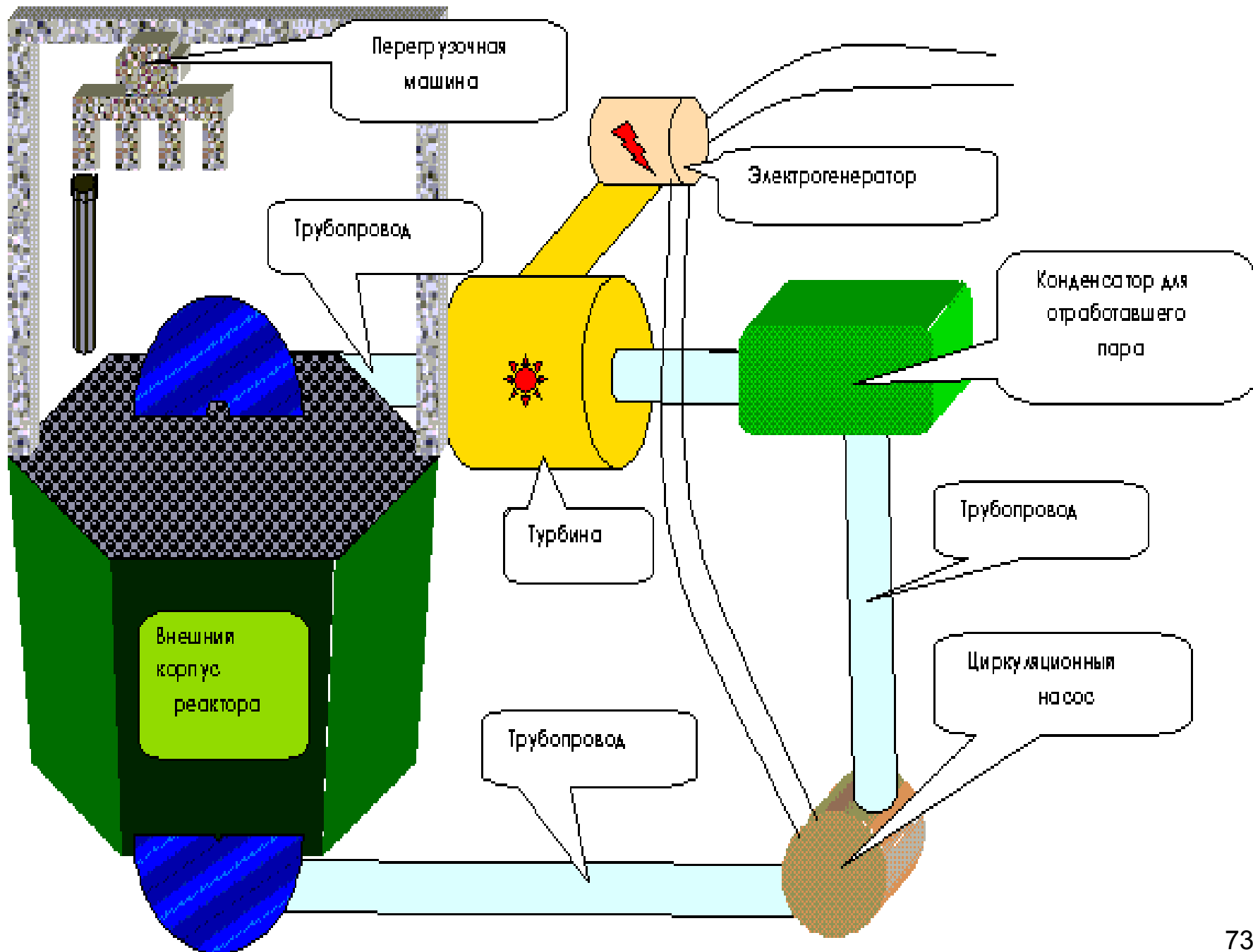
Вода второго контура находится под обычным давлением, так что в теплообменнике она превращается в пар. В теплообменнике-парогенераторе теплоноситель, циркулирующий по первому контуру, отдает тепло воде второго контура.

Пар, генерируемый в парогенераторе, по главным паропроводам второго контура поступает на турбины и, отдает часть своей энергии на вращение турбины, после чего поступает в конденсатор. Конденсатор, охлаждаемый водой циркуляционного контура (третий контур), обеспечивает сбор и конденсацию отработавшего пара. Конденсат, пройдя систему подогревателей, подается снова в теплообменник.

Энергетическая мощность большинства реакторов ВВЭР в нашей стране - 1000 мегаватт (МВт).

РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный)

- РБМК построен по несколько другому принципу, чем ВВЭР.
- Прежде всего в его активной зоне происходит кипение - из реактора поступает пароводная смесь, которая, проходя через сепараторы, делится на воду, возвращающуюся на вход реактора, и пар, который идет непосредственно на турбину.



- **Активная зона реактора — вертикальный цилиндр диаметром 11.8 метров и высотой 7 метров.**

По периферии активной зоны, а также сверху и снизу расположен боковой отражатель - сплошная графитовая кладка.

Активная зона собрана из графитовых шестигранных колонн, собранных из блоков. По центру каждого блока сквозь всю колонну проходят сквозные отверстия для размещения технологических каналов и стержней СУЗ (система управления защитой).

Кассета (конструкция из таблеток урана и собирающего их вместе корпуса) состоит из двух последовательно соединенных тепловыделяющих сборок (ТВС),

Стенки кассеты плотно фиксированы к графитовой кладке, а внутри кассет циркулирует вода. В остальных каналах расположены стержни системы управления защитой, которые состоят из поглотителя - бороциркониевого сплава.

Некоторые каналы полностью изолированы от теплоносителя, и в них расположены датчики радиации.

Электрическая мощность РБМК - 1000 Мвт.

АЭС с реакторами РБМК составляют заметную долю в атомной энергетике.

Так, ими оснащены Ленинградская, Курская, Чернобыльская, Смоленская, Игналинская АЭС.

- При возникновении нештатных ситуаций, реактор ВВЭР заглохнет, а реактор РБМК продолжит разгон с нарастающей интенсивностью, что может привести к очень интенсивному тепловыделению, результатом которого будет расплавление активной зоны реактора.
- Это очень опасно, так как при контакте расплавленных циркониевых оболочек с водой происходит разложение ее на водород и кислород, образующих крайне взрывчатый гремучий газ, при взрыве которого неизбежно разрушение активной зоны и выброс радиоактивных топлива и графита в окружающую среду.

Именно по такому пути развивались события при аварии на Чернобыльской АЭС. Поэтому в реакторе РБМК как нигде важна роль защитных систем, которые будут или предотвращать разгон реактора, или экстренно его охлаждать в случае разгона, гася подъем температуры и вскипание теплоносителя.

Современные реакторы типа РБМК оборудованы достаточно эффективными подобными системами, практически сводящими на нет риск развития аварии (на Чернобыльской АЭС в ночь аварии по преступной халатности в нарушение всех инструкций и запретов были полностью отключены системы аварийной защиты).

Реактор РБМК требует меньшего обогащения топлива, обладает лучшими возможностями по наработке делящегося материала (плутония), имеет непрерывный эксплуатационный цикл, но более опасен в эксплуатации, у него больше радиационные выбросы в атмосферу.

Реактор на тяжелой воде.

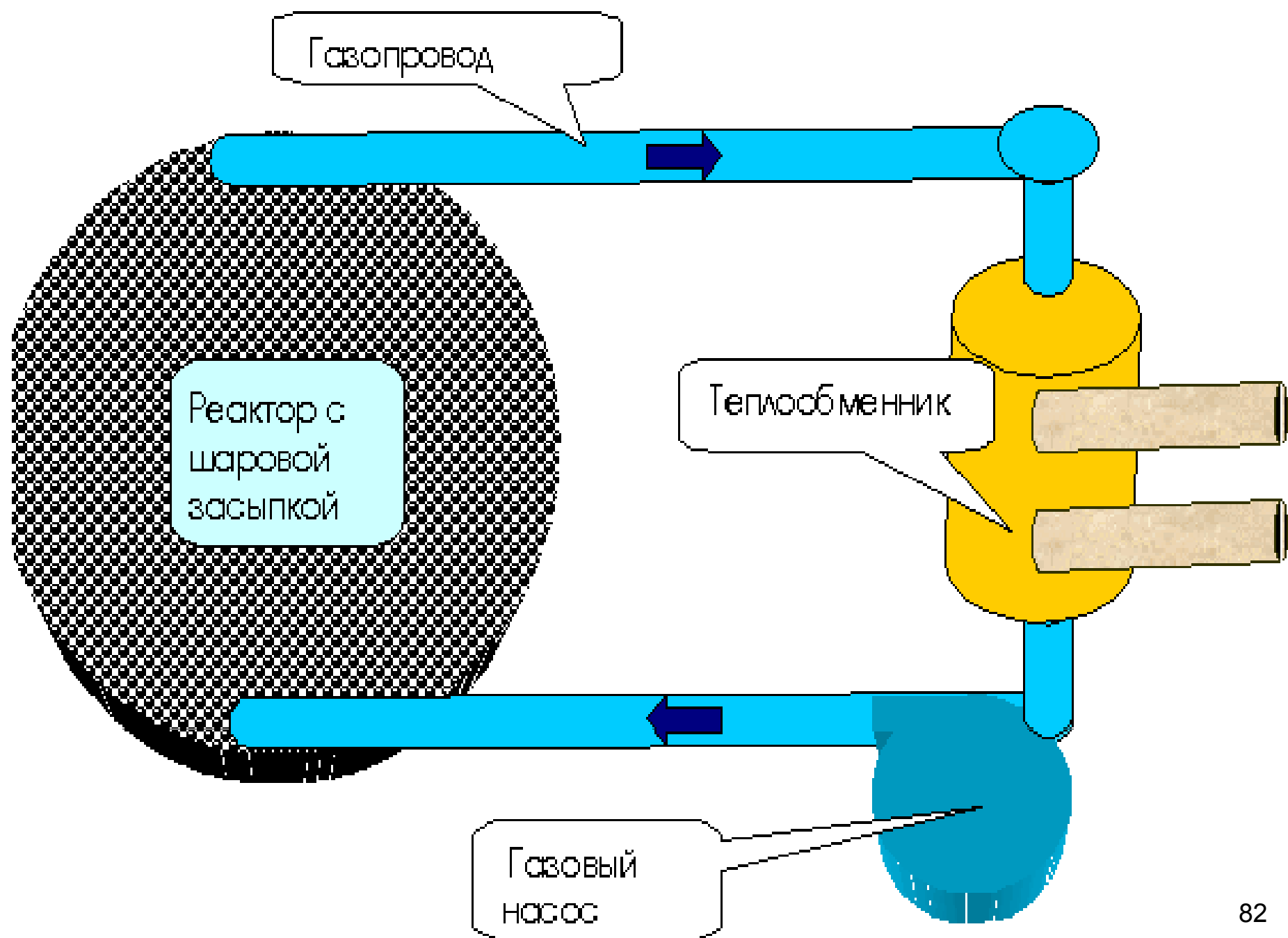
- У тяжелой воды очень низкая степень поглощения нейтронов и очень высокие замедляющие свойства, превышающие аналогичные свойства графита. Вследствие этого реакторы на тяжелой воде работают на необогащенном топливе, что позволяет не строить сложные и опасные предприятия по обогащению урана.
- В принципе хорошо спроектированный и построенный реактор на тяжелой воде может работать долгие годы на естественном уране, нуждающемся лишь в выделении его из руды, и давать дешевую энергию.
- Но тяжелая вода очень дорога в производстве, и поэтому вследствие неизбежных утечек ее из трубопроводов суммарные затраты на эксплуатацию реактора возрастают и приближаются к аналогичным у РБМК и ВВЭР

В качестве теплоносителя первого контура может использоваться замедлитель - тяжелая вода, хотя имеются реакторы, где теплоноситель - легкая вода, а контуры циркуляции теплоносителя и замедлителя разделены.

Конструкция реактора во многом аналогична конструкции реактора ВВЭР.

Реактор с шаровой засыпкой.

- В реакторе с шаровой засыпкой активная зона имеет форму шара, в который засыпаны тепловыделяющие элементы, также шарообразные.
- Каждый элемент представляет из себя графитовую сферу, в которую вкраплены частицы оксида урана.
- Через реактор прокачивается газ - чаще всего используется углекислота CO_2 . Газ подается в активную зону под давлением и впоследствии поступает на теплообменник.
- Регулирование реактора осуществляется стержнями из поглотителя, вставляемыми в активную зону.



Реактор на быстрых нейтронах.

Реактор на быстрых нейтронах очень сильно отличается от реакторов всех остальных типов.

Его основное назначение - обеспечение расширенного воспроизводства делящегося плутония из урана-238 с целью сжигания всего или значительной части природного урана, а также имеющихся запасов обедненного урана.

При развитии энергетики реакторов на быстрых нейтронах может быть решена задача самообеспечения ядерной энергетики ТОПЛИВОМ.

Заключение.

Атомная энергетика - активно развивающаяся отрасль. Очевидно, что ей предназначено большое будущее, так как запасы нефти, газа, угля постепенно иссякают, а уран - достаточно распространенный элемент на Земле.

Ядерное оружие



Ядерное оружие

Массу ^{239}Pu ^{235}U

Совокупность делящегося вещества,
необходимого для
самоподдерживающегося процесса-
критическая сборка.

можно сделать **надкритической**.

В этом случае **возникающие при делении нейтроны будут вызывать несколько вторичных делений**.

Поскольку нейтроны движутся со скоростями, превышающими 10^8 см/с, **надкритическая сборка может полностью прореагировать (или разлететься) быстрее, чем за тысячную долю секунды**.

Такое устройство называется атомной бомбой

Организация Манхэттенского Проекта



Бригадный генерал
Лесли Гровс



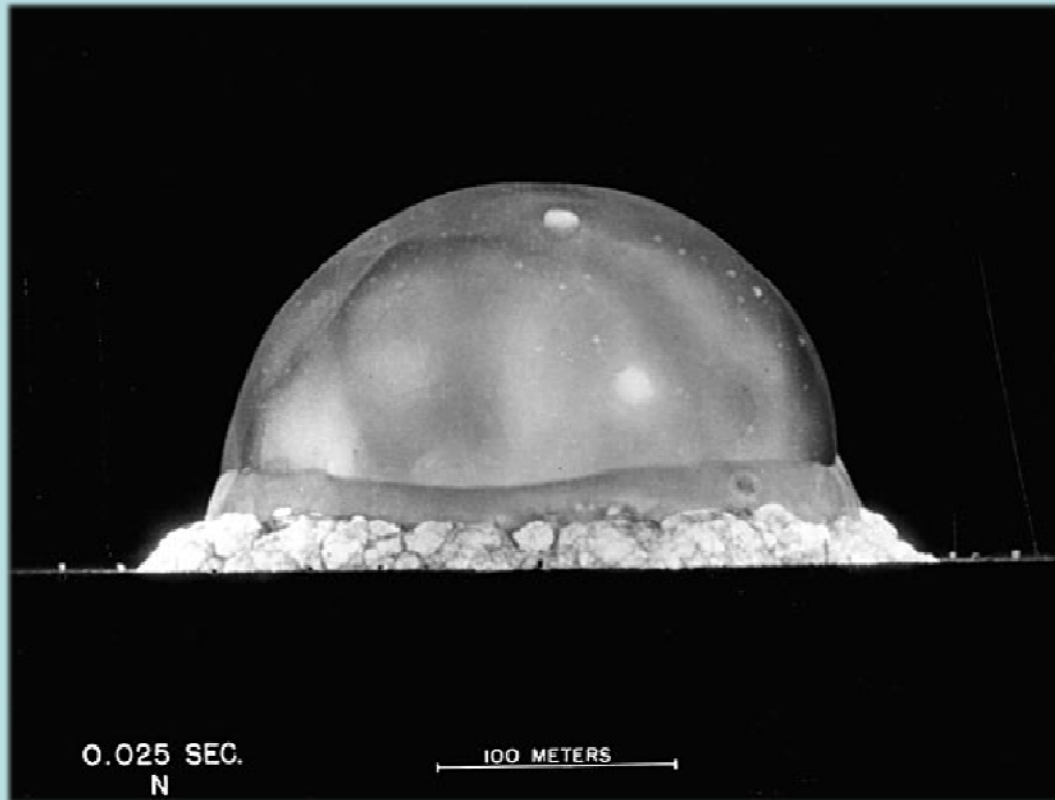
Роберт Оппенгеймер

Первые испытания. «100-тонный тест.»



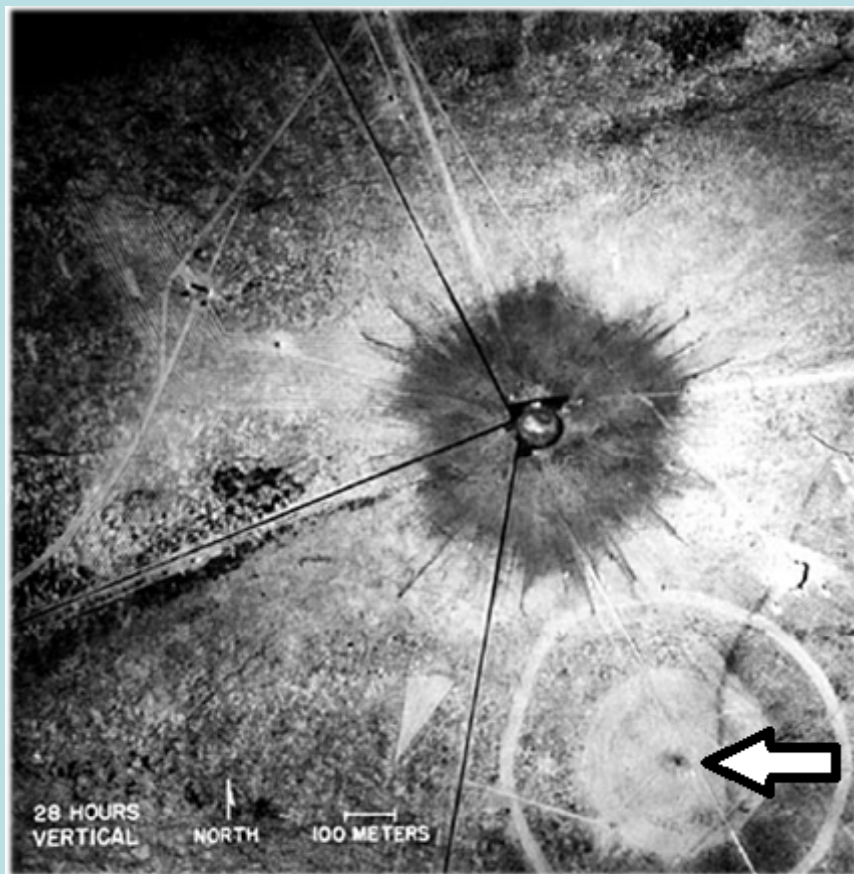
7 Мая 1945 состоялся экспериментальный взрыв 108 тонн композиции В (смеси TNT/RDX - тола и гексагена) в целях проверки и калибровки регистрирующего оборудования

Первое испытание атомной бомбы. Атомный взрыв.



16 Июля 1945, 5:29:45
полигон Аламагордо,
пустыня Jornada del
Muerto
Мощность: 20-22 кт
25-я миллисекунда
взрыва.

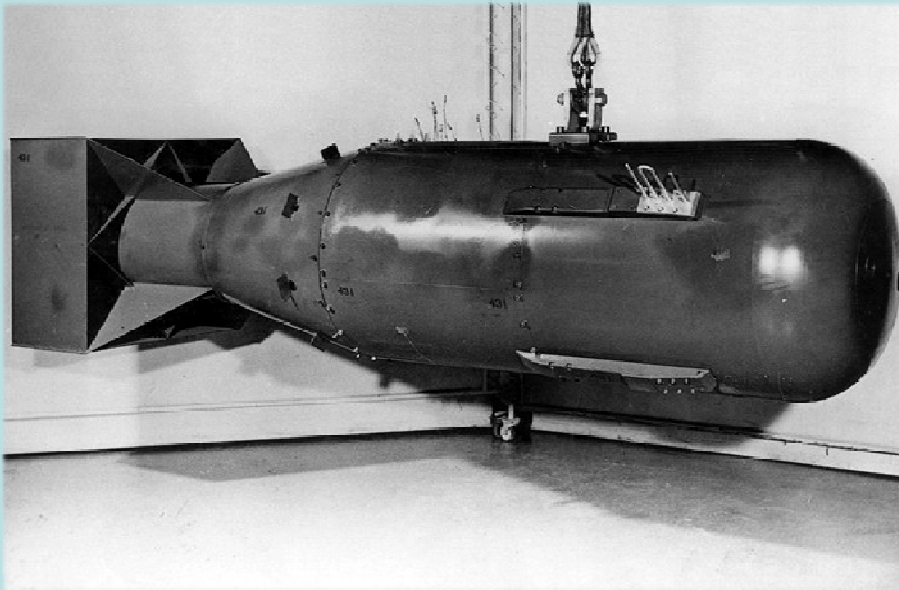
Последствия взрыва.



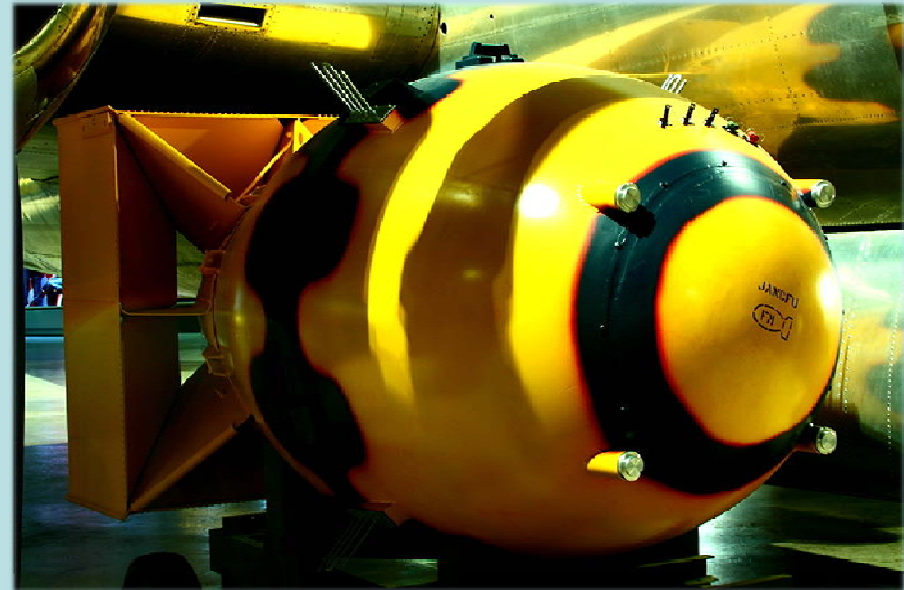
Картина последствий испытания, 28 часов спустя. Тёмное пятно на фотографии — спёкшаяся в рыхлую корку земля (тринитит). В нижней правой части рисунка виден кратер от 100-тонного теста

Первые слова бригадного генерала Т. Фарелла, когда он подошел к Гровсу, были: "Война кончена". На это Гровс ответил: "Да, но после того, как мы сбросим ещё две бомбы на Японию".

Итоги. Хиросима и Нагасаки.

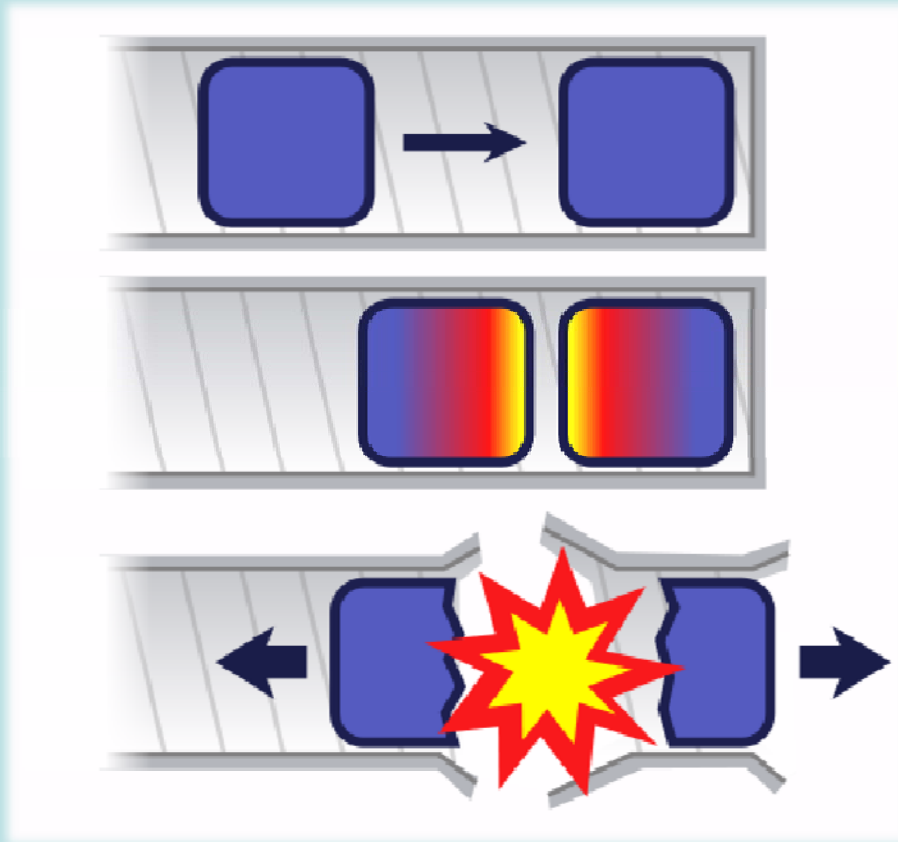


Макет бомбы «Little Boy», сброшенной на Хиросиму



Макет бомбы «Fat Man», сброшенной на Нагасаки

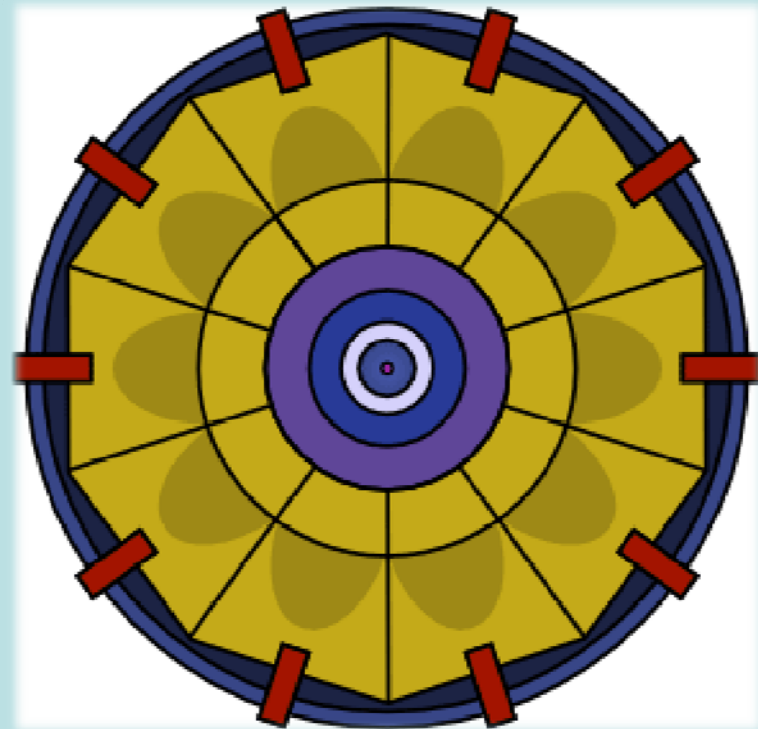
Варианты детонации. Пушечная схема.



Один блок
делящегося
вещества
докритической
массы («пуля»)
выстреливается
в другой
 («мишень»).

Имплозивная схема.

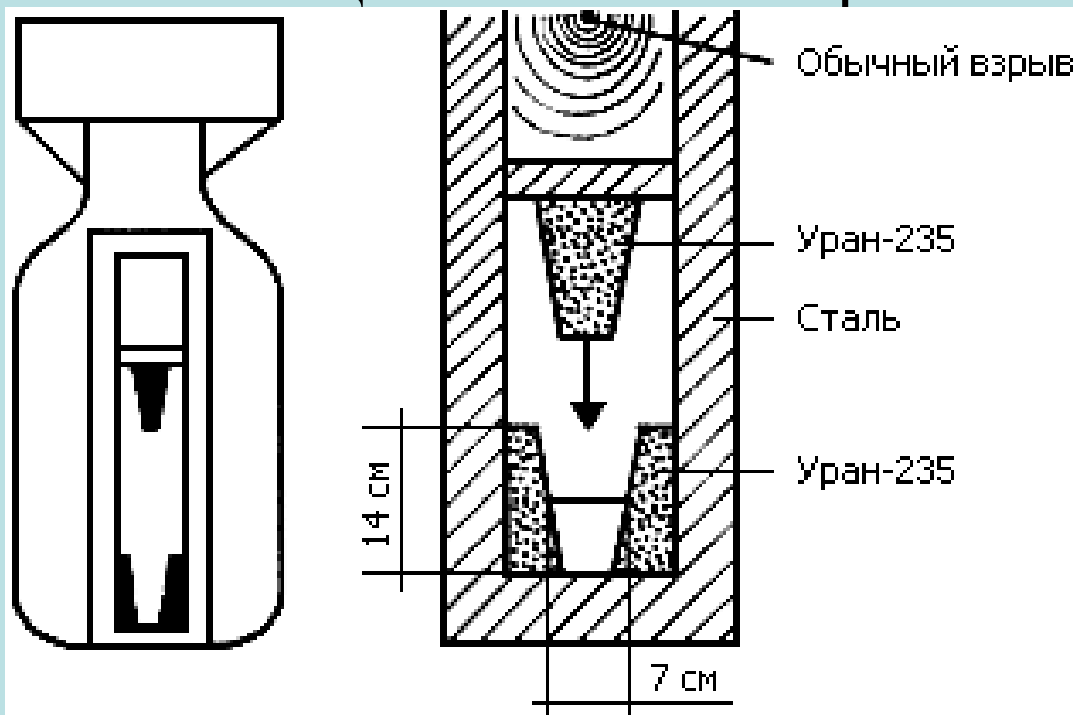
Получение
сверхкритического
состояния путём
обжатия
делящегося
материала
сфокусированной
ударной волной.

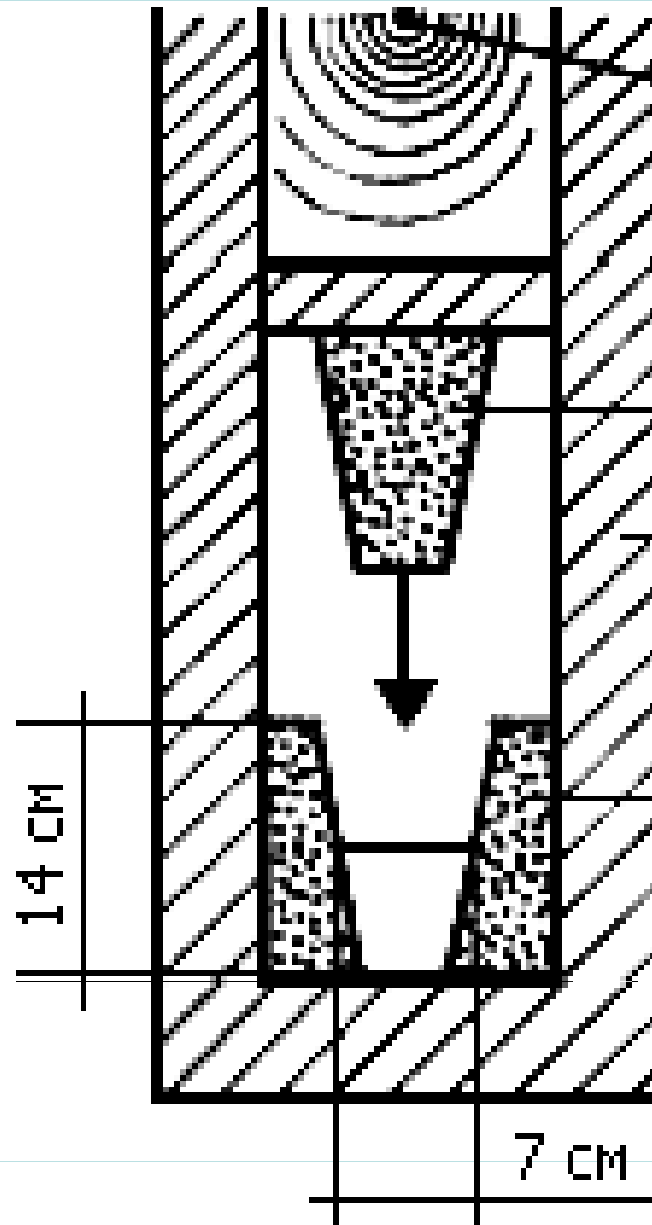
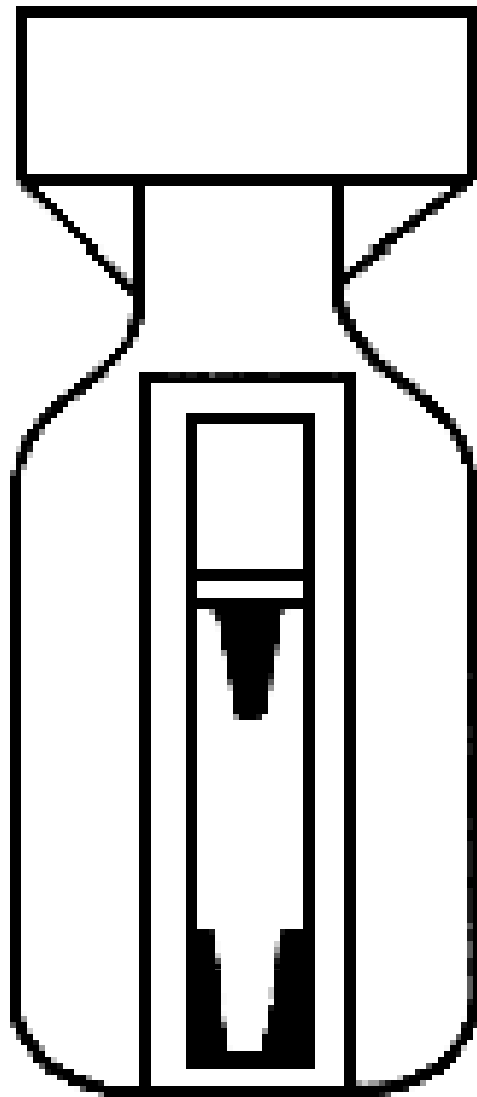


На рис. изображена **схема атомной бомбы «Малыш»**, сброшенной на Хиросиму.

Ядерной взрывчаткой в бомбе служил ^{235}U разделенный на две части, масса которых была меньше критической.

Необходимая для взрыва критическая масса ^{235}U создавалась в результате соединения обеих частей «методом пушки» с помощью обычной взрывчатки.





Обычный взрыв

Уран-235

Сталь

Уран-235

14 CM

7 CM

При взрыве 1 т тринитротолуола (ТНТ) высвобождается 10^9 кал, или $4 \cdot 10^9$ Дж. При взрыве атомной бомбы, расходующей 1 кг плутония, высвобождается около $8 \cdot 10^{13}$ Дж энергии.

Это почти в 20 000 раз больше, чем при взрыве 1 т ТНТ. Такая бомба называется 20-килотонной бомбой.

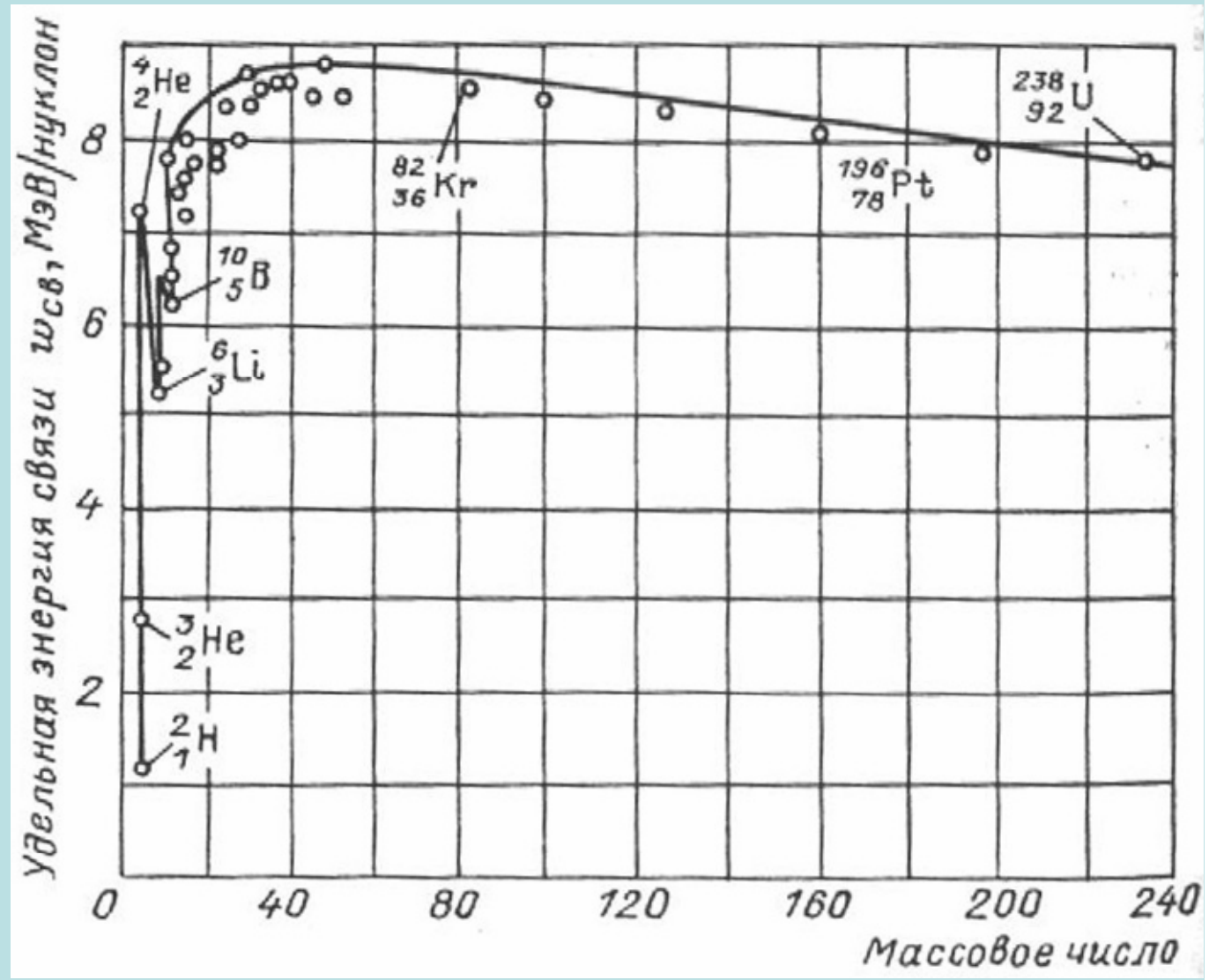
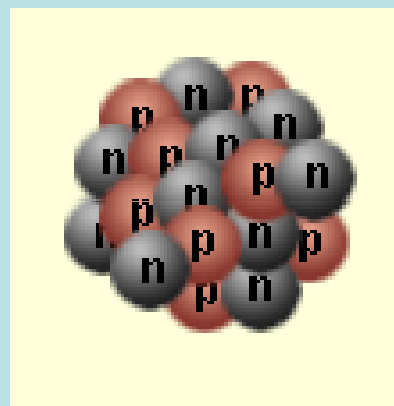
Современные бомбы мощностью в мегатонны в миллионы раз мощнее обычной ТНТ-взрывчатки.



Синтез ядер

Удельной энергией связи ядра $\omega_{\text{св}}$ называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}$$



Синтез ядер

Масса или энергия покоя двух легких ядер оказывается больше, чем у суммарного ядра.

Если легкие ядра привести в соприкосновение, то результирующее ядро имело бы меньшую массу и высвободилась бы энергия, равная разности масс.

Например: Если соединить два дейтрона и получить ядро гелия, масса которого меньше суммарной массы двух дейтронов на 24 МэВ, то высвободится энергия синтеза 24 МэВ.

Процесс синтеза примерно в 6 раз эффективнее процесса деления урана.

В воде озер и океанов имеются неограниченные запасы недорогого дейтерия.

Серьезным препятствием на пути к получению энергии в неограниченных количествах из «воды» является закон Кулона.

Электростатическое отталкивание двух дейтронов при комнатной температуре не позволяет им сблизиться до расстояний, на которых сказываются короткодействующие ядерные силы притяжения.

Для получения управляемой термоядерной энергии и для инициирования термоядерного взрыва водородной бомбы необходима температура около $5 \cdot 10^7$ К.

Ядерные реакции, требующие для своего осуществления температур порядка миллионов градусов, называются **термоядерными**.

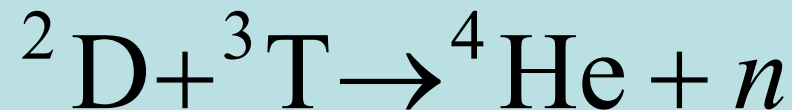
Мгновенные температуры, развивающиеся при взрыве атомной бомбы, оказываются достаточно высокими, чтобы **поджечь термоядерное горючее**.

Вместо жидкого дейтерия в качестве горючего используется соединение LiD, причем только с изотопом ${}^6\text{Li}$.

Изотоп ${}^6\text{Li}$ поглощает нейтроны, возникающие в реакции ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + n$ таким образом,



Затем тритий (${}^3\text{T}$) вступает в реакцию



Происходит выгорание дешевого дейтерида лития-6 (${}^6\text{Li}$ ${}^2\text{D}$) с образованием ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ и нейтронов.

Начавшись, термоядерные реакции сопровождаются выделением энергии, и этим обеспечивается поддержание высоких температур, пока большая часть вещества быстро не «выгорит».

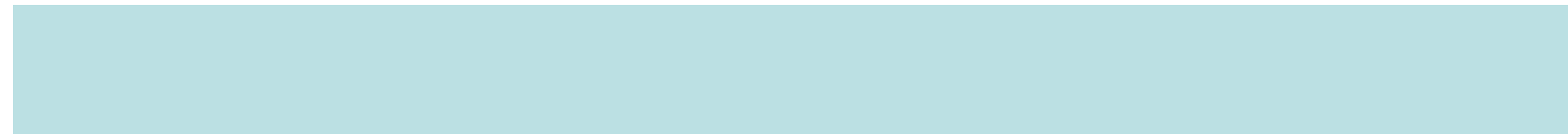
Происходит взрыв водородной бомбы. Термоядерное горючее для водородной бомбы (дейтерид лития-6) дешево, и нет ограничений на его количество при использовании в бомбе.

Проводились испытания бомб мощностью 60 мегатонн (с ТНТ-эквивалентом $6 \cdot 10^7$ т).

Энерговыделение при взрыве термоядерной водородной бомбы можно почти удвоить (при этом стоимость ее увеличится не намного) за счет использования оболочки из ^{238}U .

В этом случае нейтроны, возникающие в результате термоядерных реакций, вызывают деление ядер ^{238}U , что приводит к увеличению числа нейтронов, бомбардирующих ^6Li , и т.д.

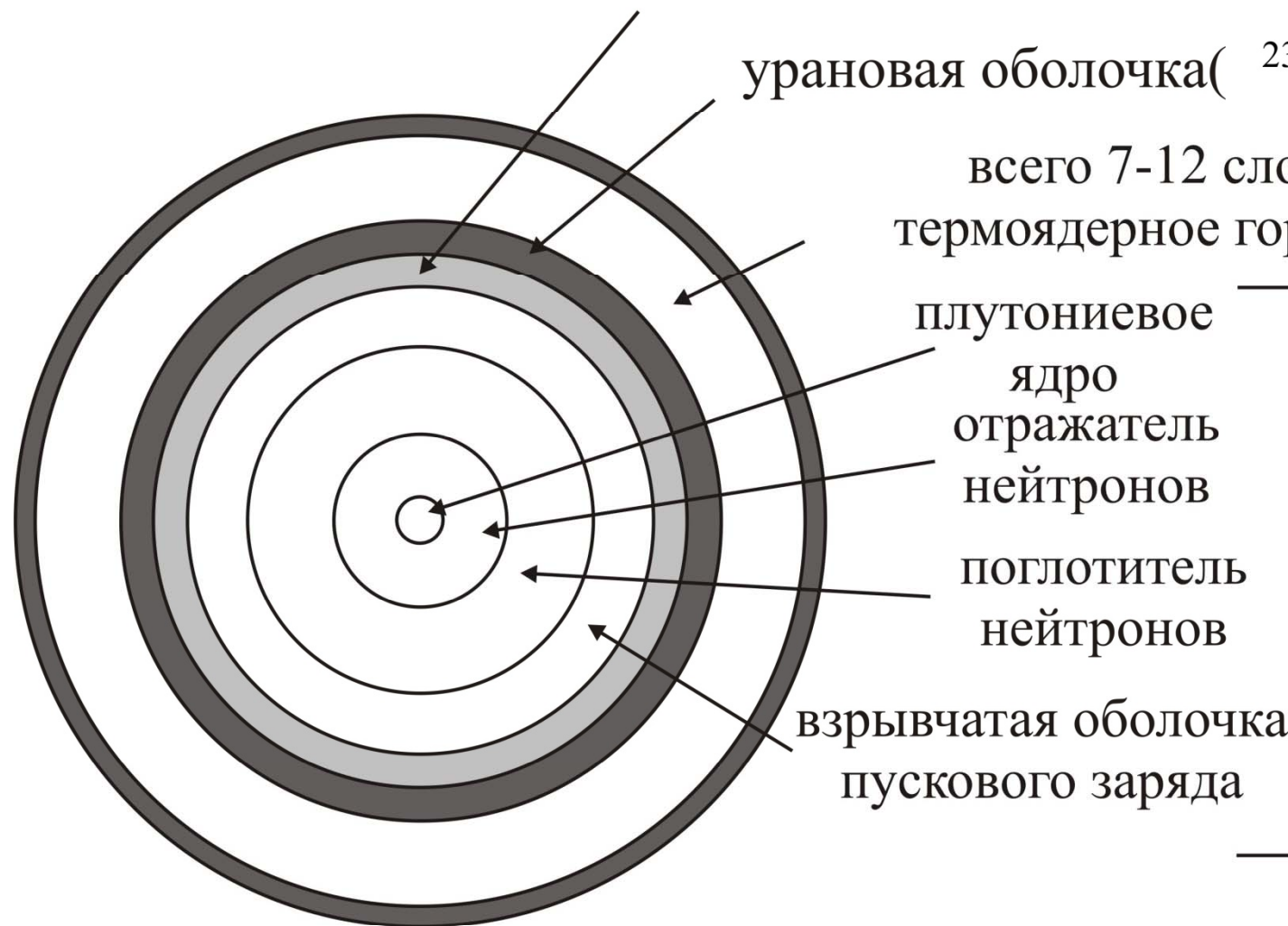
В большинстве взрывов водородных бомб энерговыделение, обусловленное делением ядер, оказывается таким же, как и получаемое в процессе синтеза, и сопровождается опасными выпадениями радиоактивных продуктов деления.



Термоядерное горючее (дейтерид лития)

урановая оболочка(^{238}U)

всего 7-12 слоев
термоядерное горючее ^{238}U

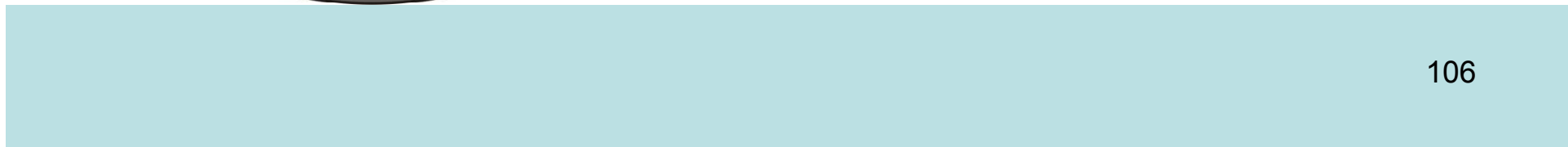


плутониевое
ядро
отражатель
нейтронов

поглотитель
нейтронов

взрывчатая оболочка
пускового заряда

атомный пусковой
заряд (триггер)



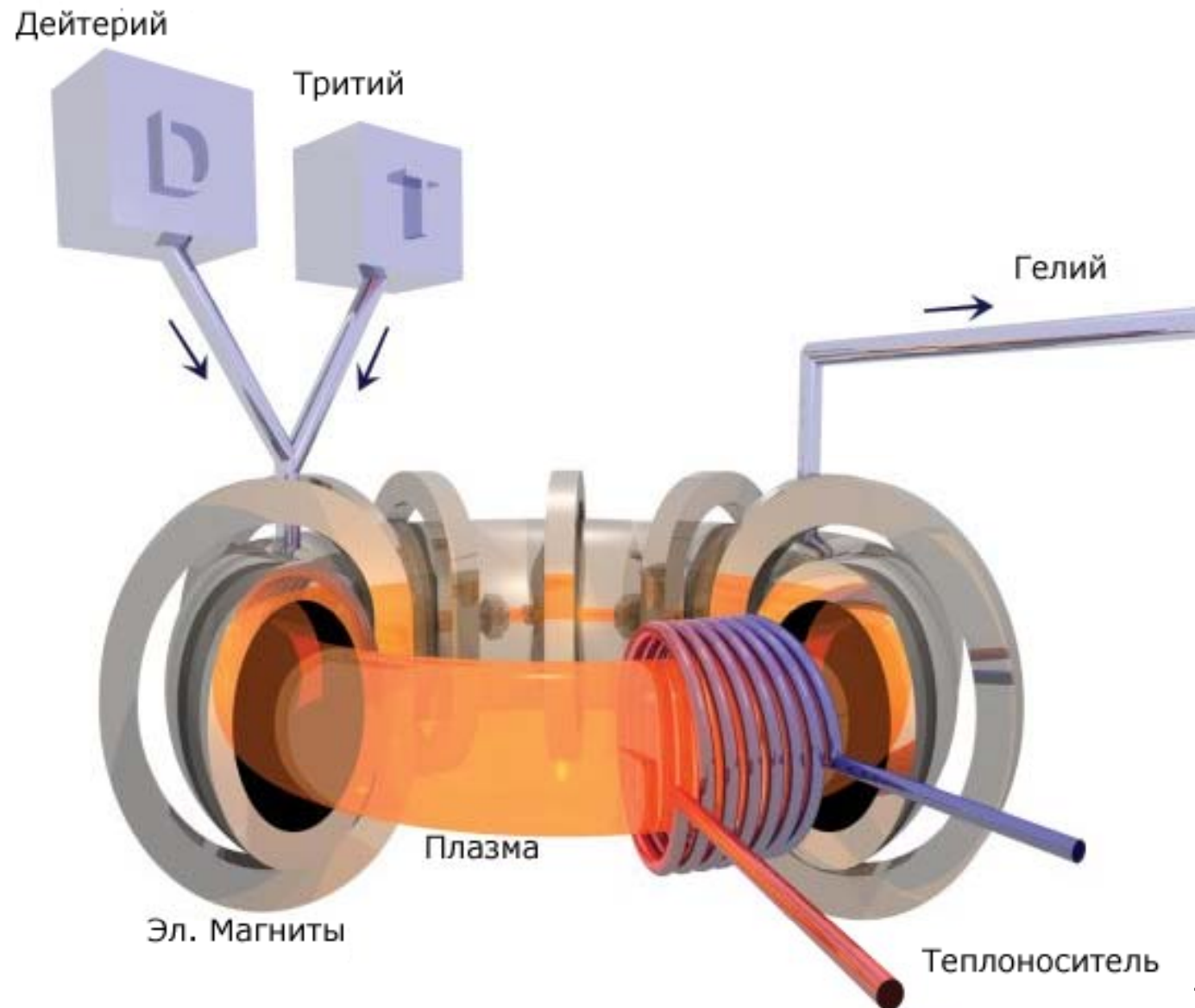
Управляемый синтез

Чтобы с помощью ядерного синтеза получить полезную энергию, термоядерные реакции должны быть управляемыми.

Необходимо найти способы создания и поддержания температур во много миллионов градусов.

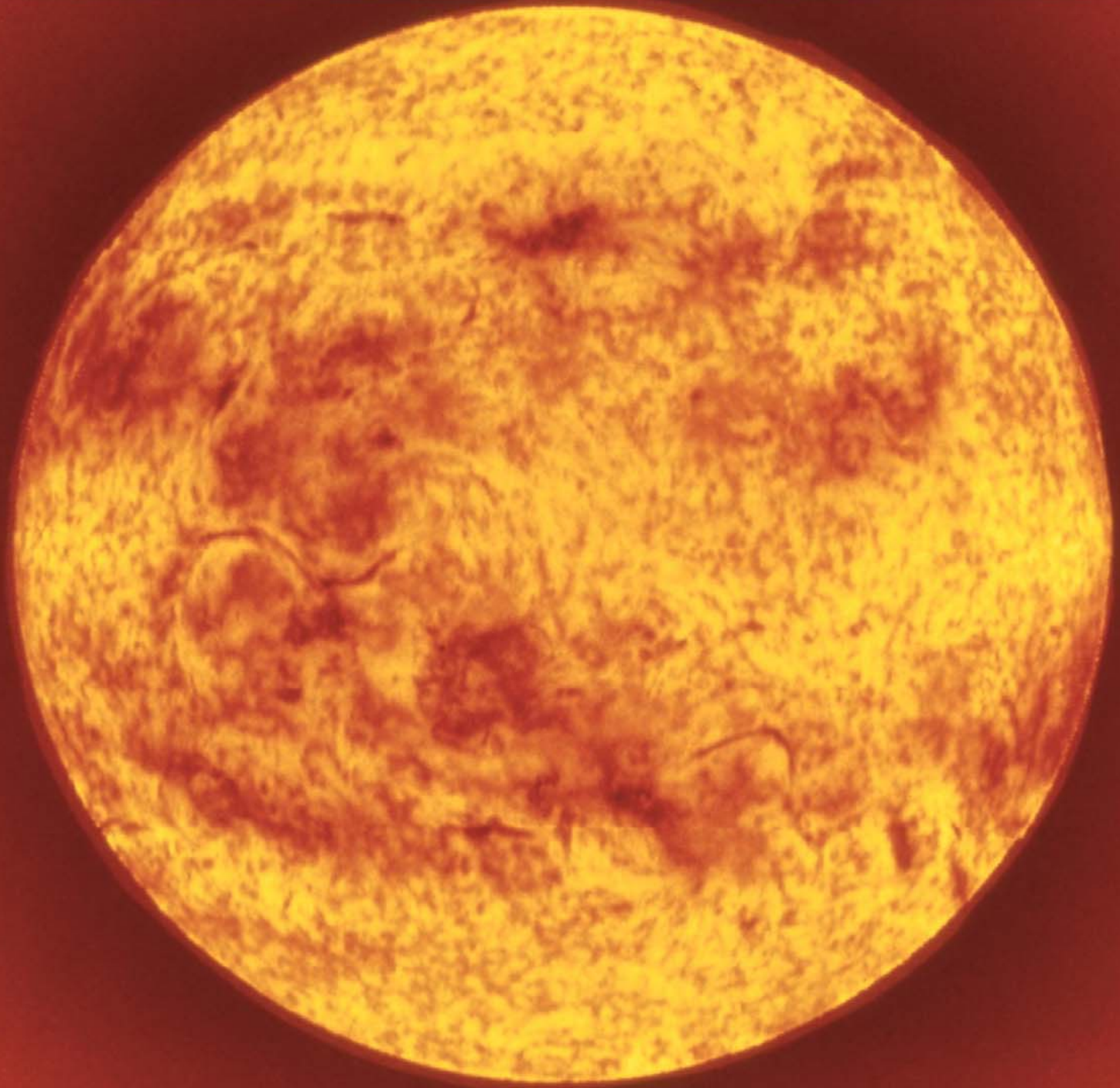
Одна из технических проблем связана с тем, что высокотемпературный газ, или плазму, нужно удерживать таким образом, чтобы не расплавились стенки соответствующего объема.

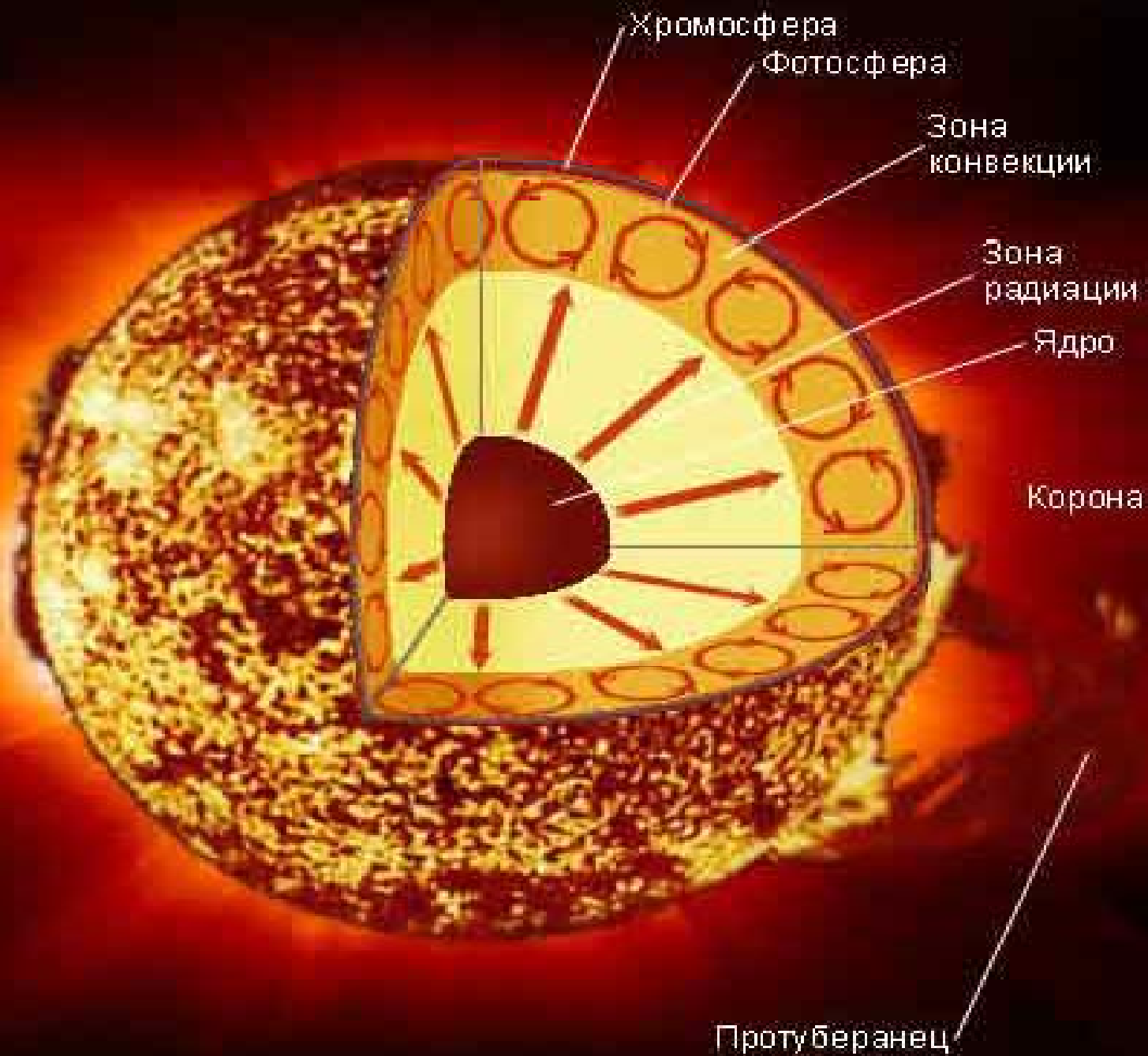
На рисунке показана предполагаемая схема конструкции термоядерного реактора.

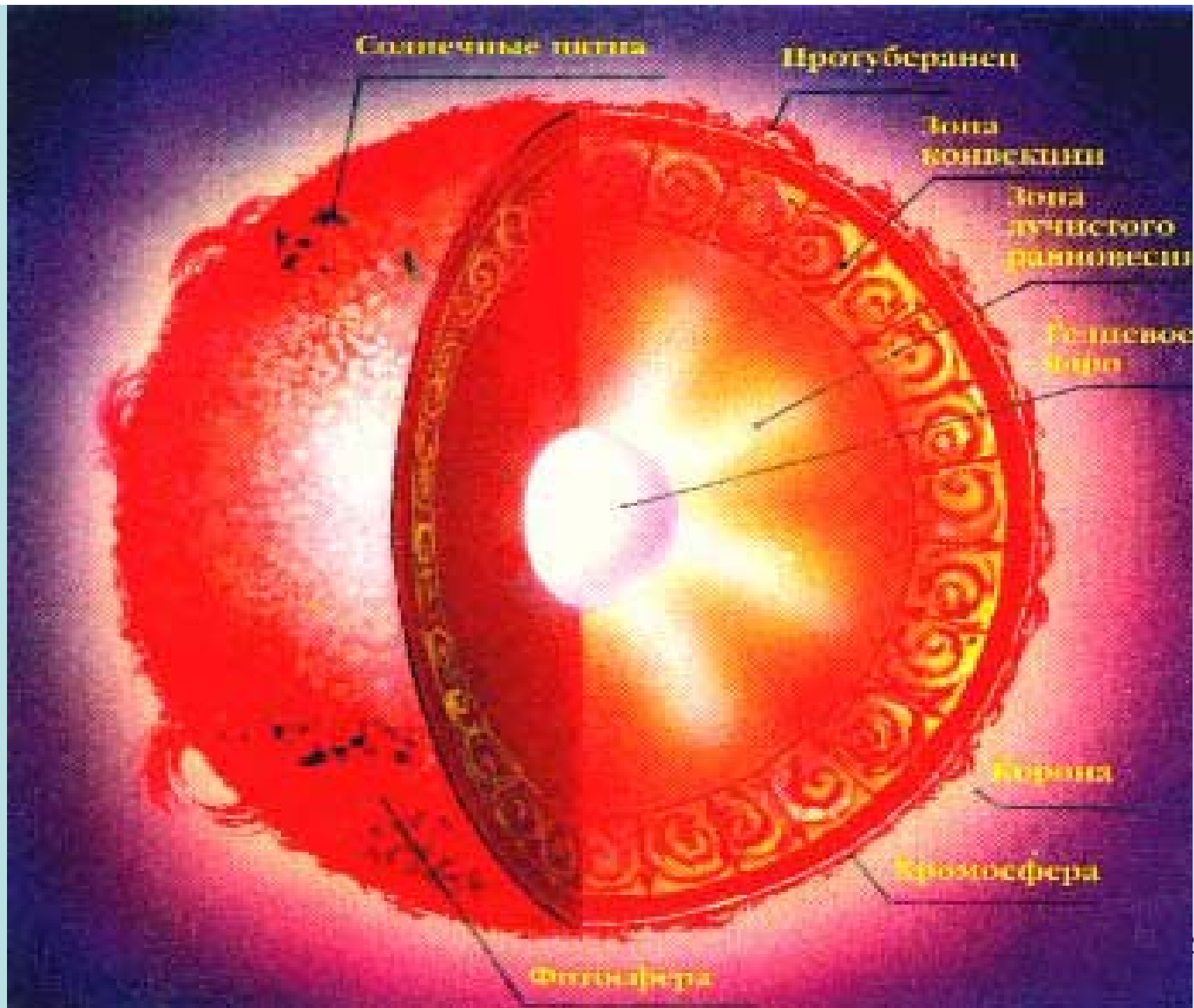


Электростанция, работающая на термоядерной реакции, из-за отсутствия в ней продуктов деления **должна иметь значительно меньшую радиоактивность** по сравнению с ядерными реакторами.

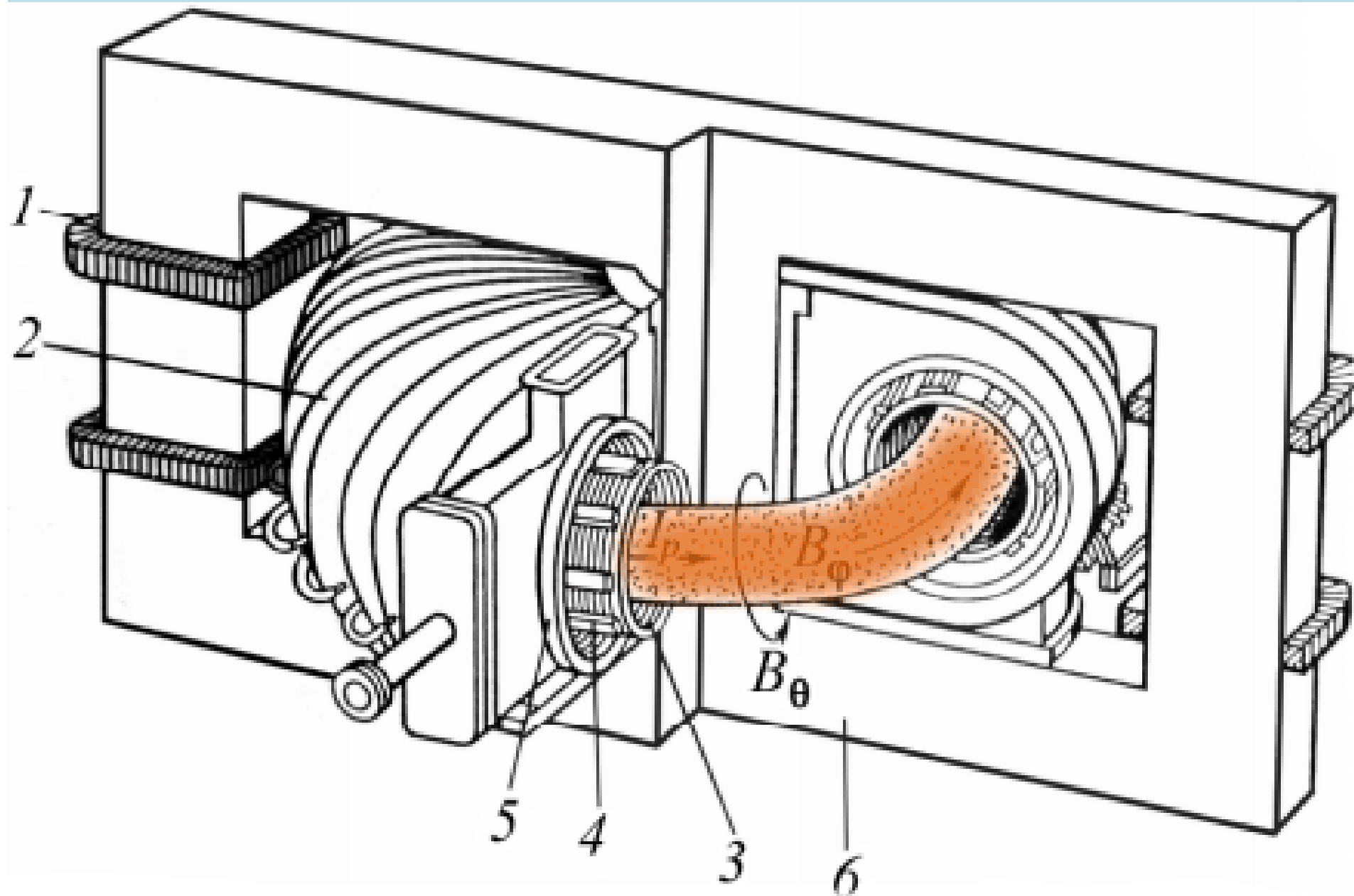
Однако в термоядерных установках испускается, а затем захватывается большое число нейтронов, что, как правило, приводит к образованию радиоактивных изотопов. Поэтому вокруг камеры с плазмой предполагается создавать оболочку («бланкет») из лития. И в этом случае нейтроны будут производить тритий (изотоп водорода ^3T с периодом полураспада 12 лет), который можно использовать в дальнейшем как горючее.



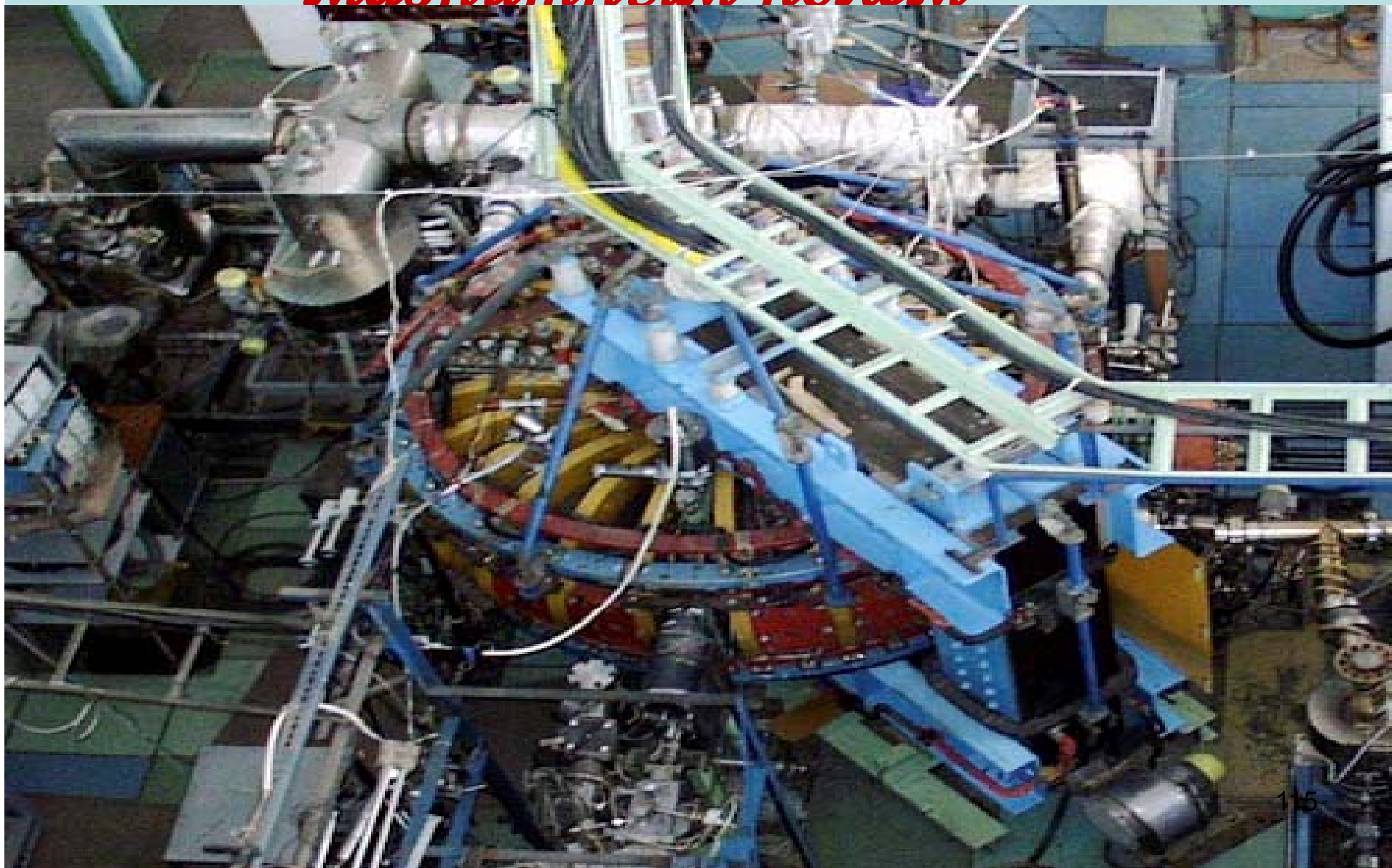




<http://www.youtube.com/watch?v=ZhA1esNC8QU>



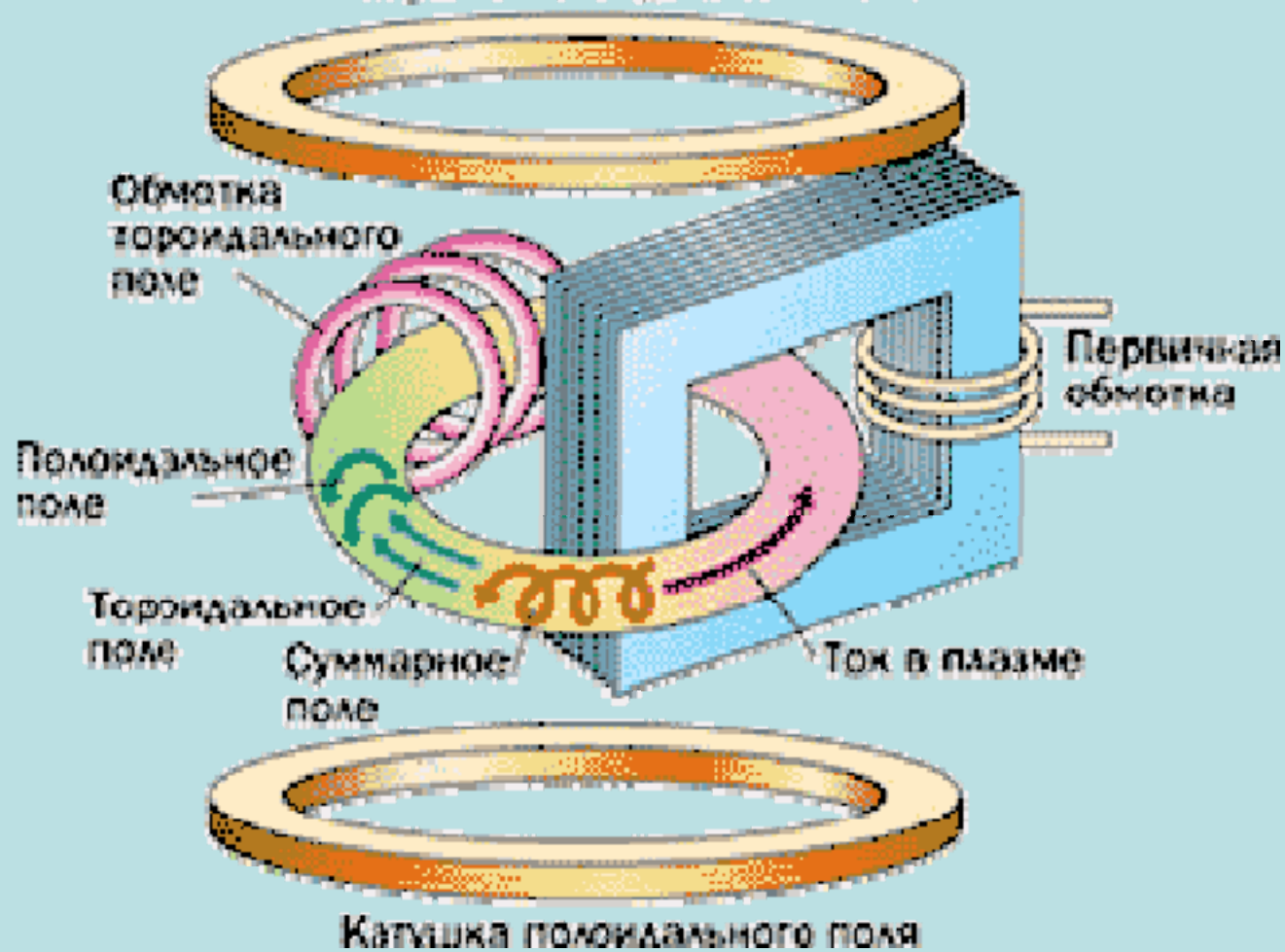
Тороидальная камера с магнитным полем

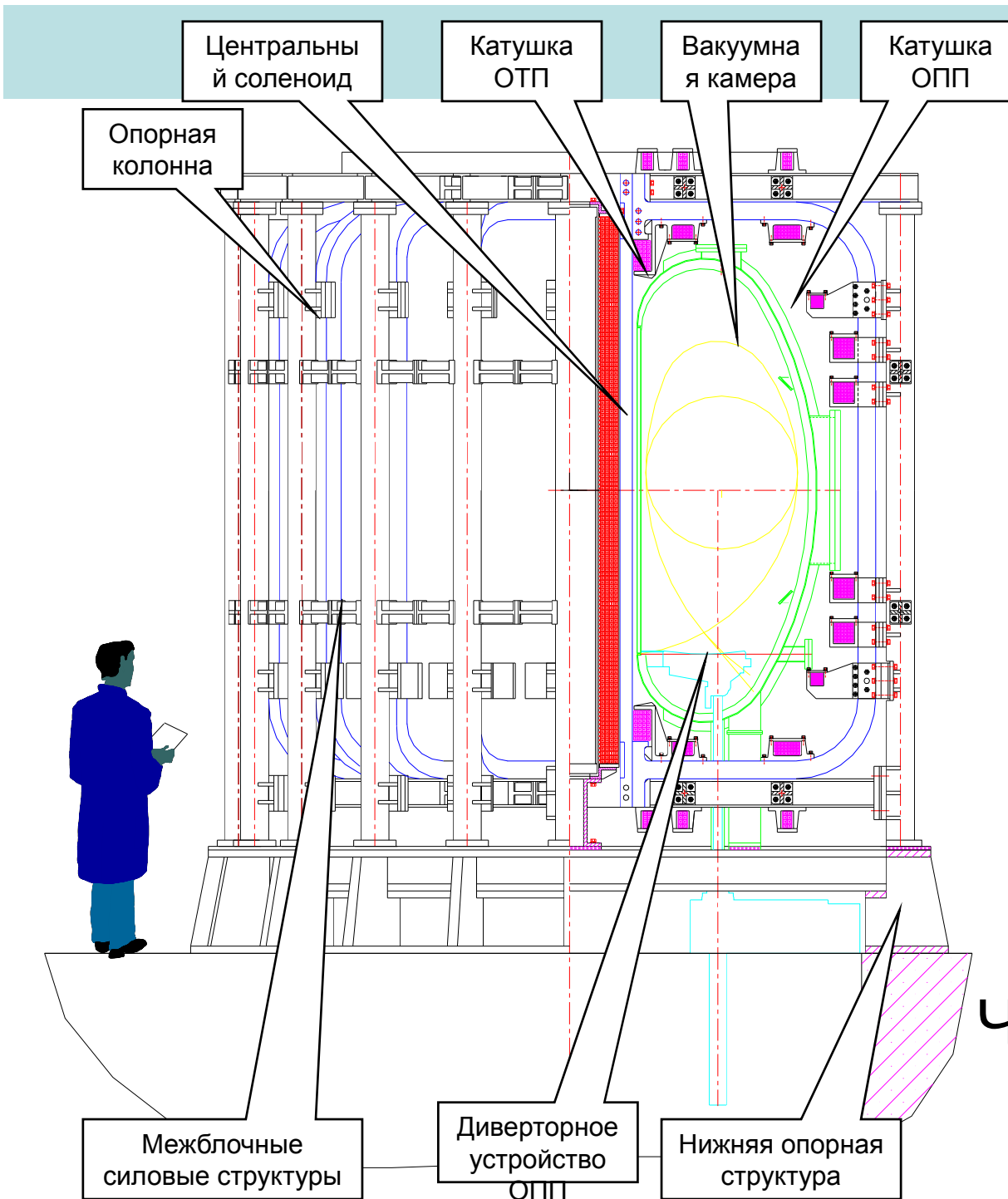


Принципиальная схема

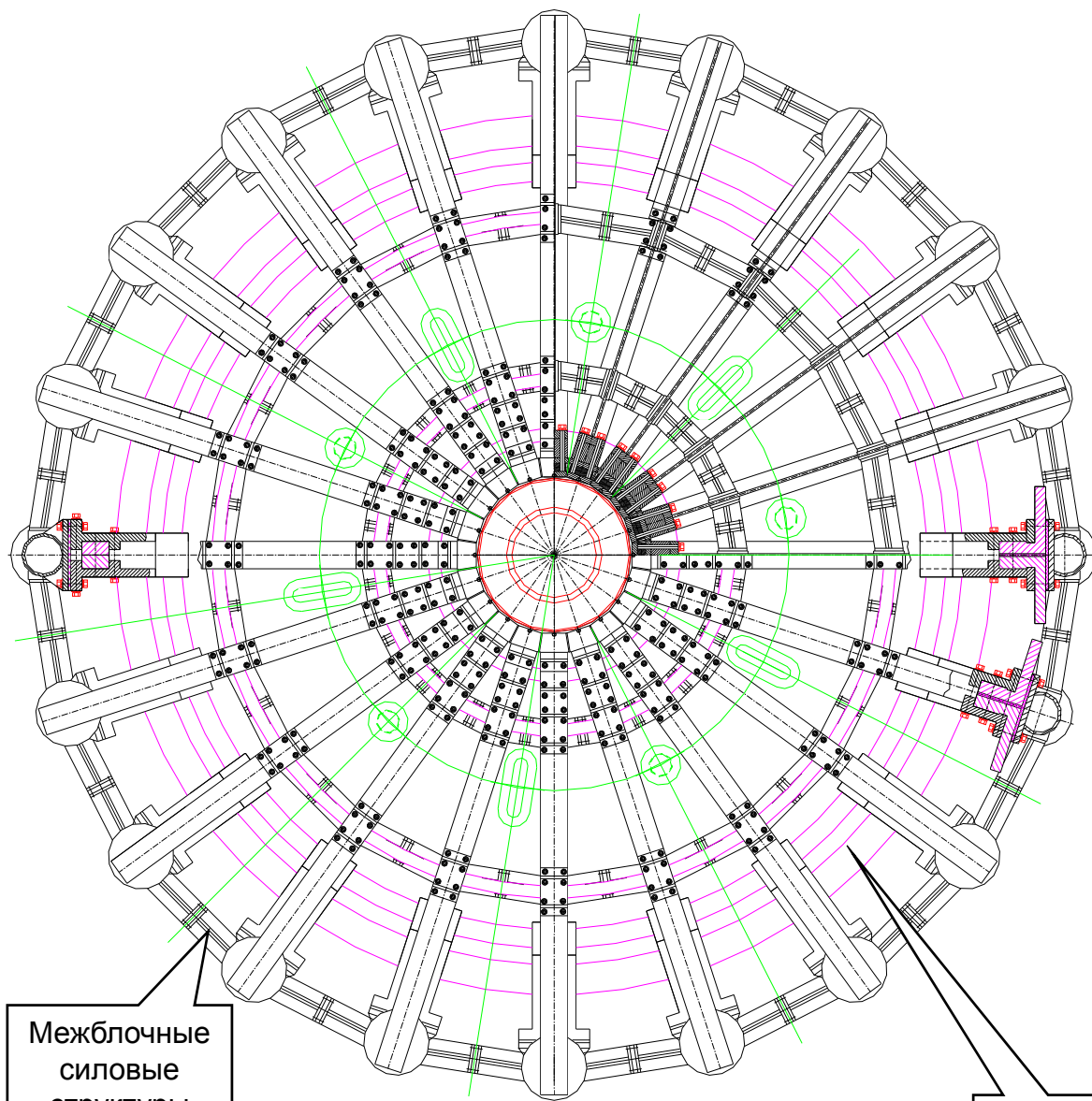
установки:

Катушка поперечного поля

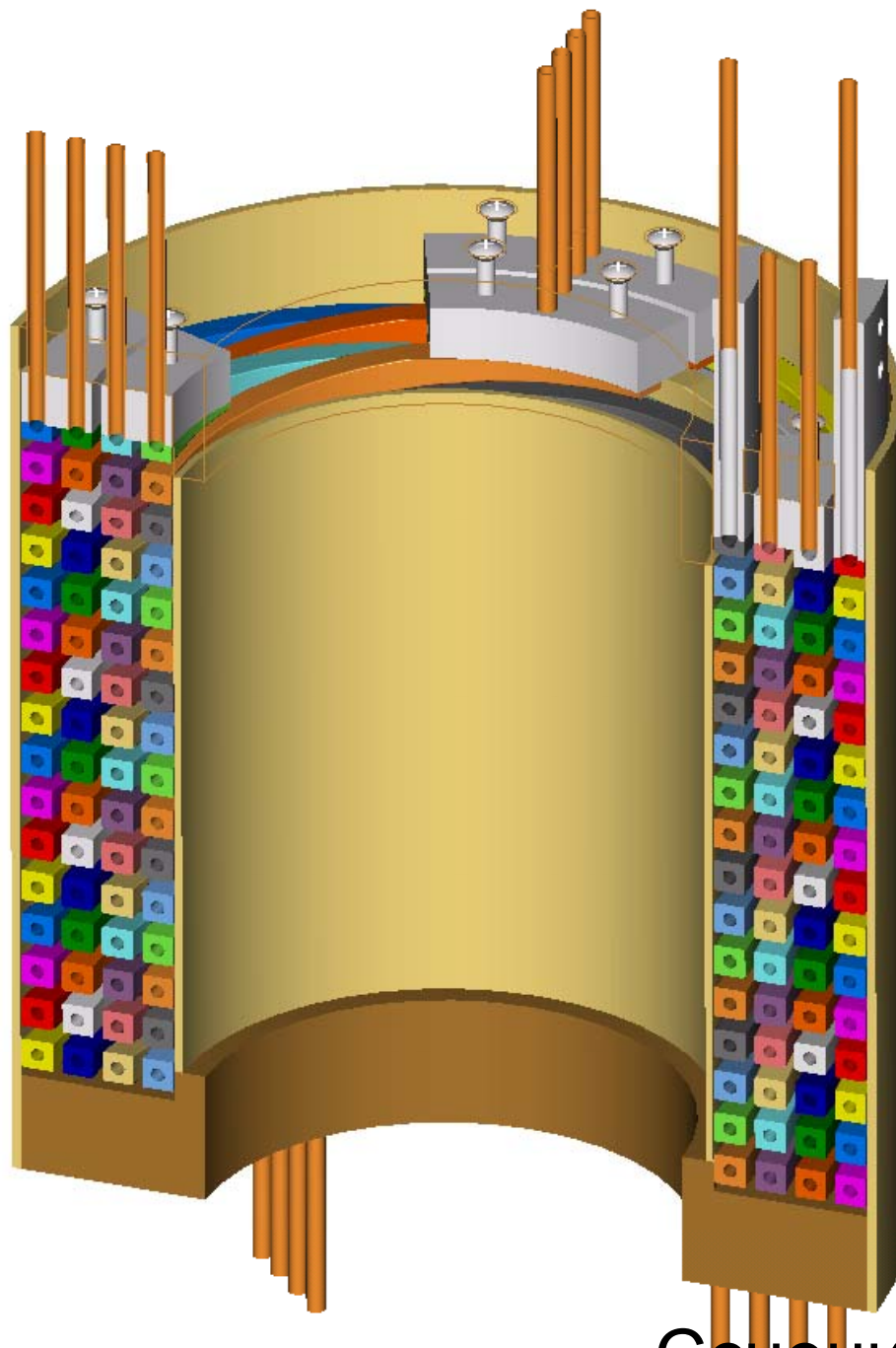




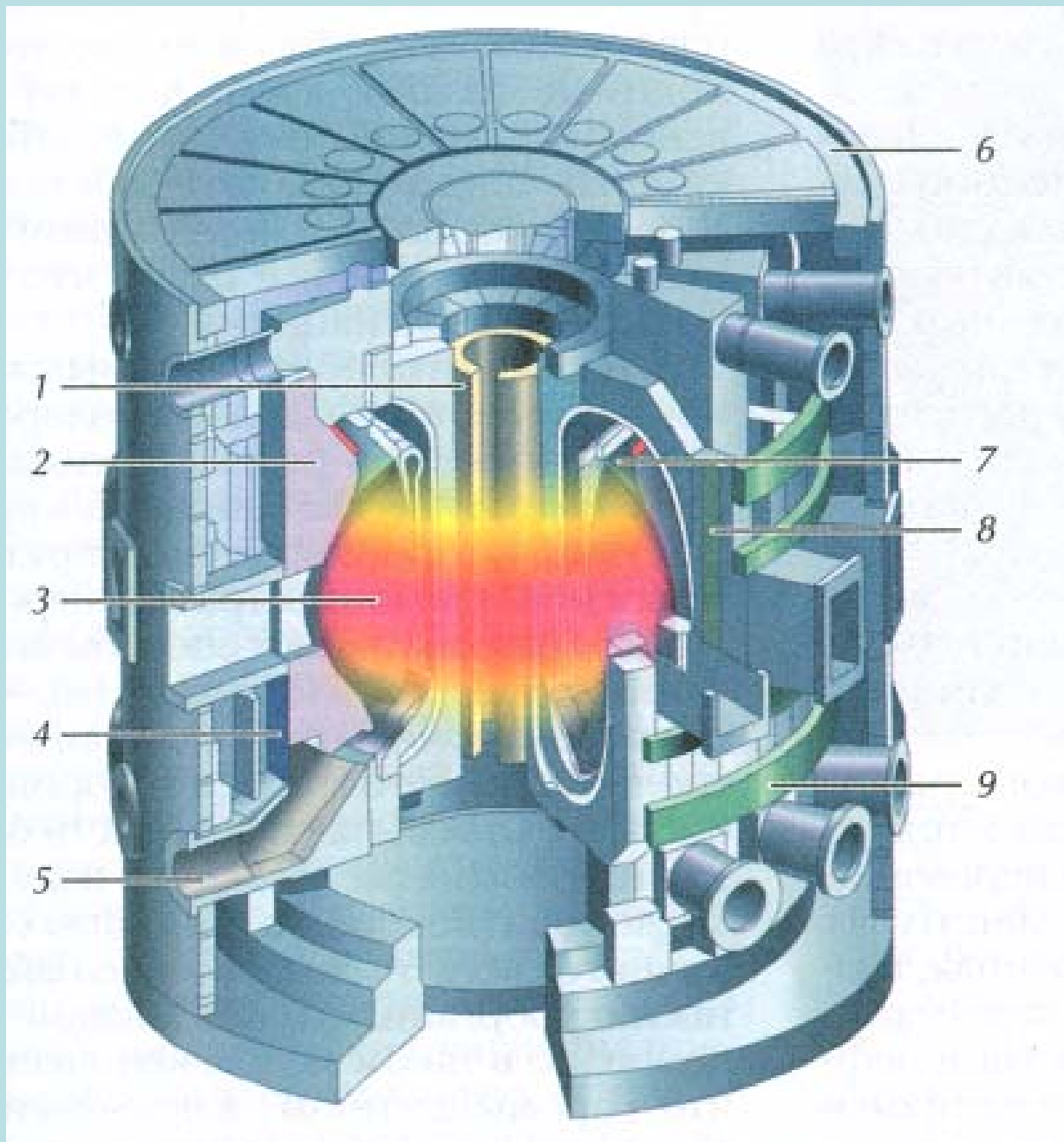
Чертеж общего вида КТМ с сечением.



Вид в плане на КТМ с вакуумной камерой.



Сечение центрального соленоид



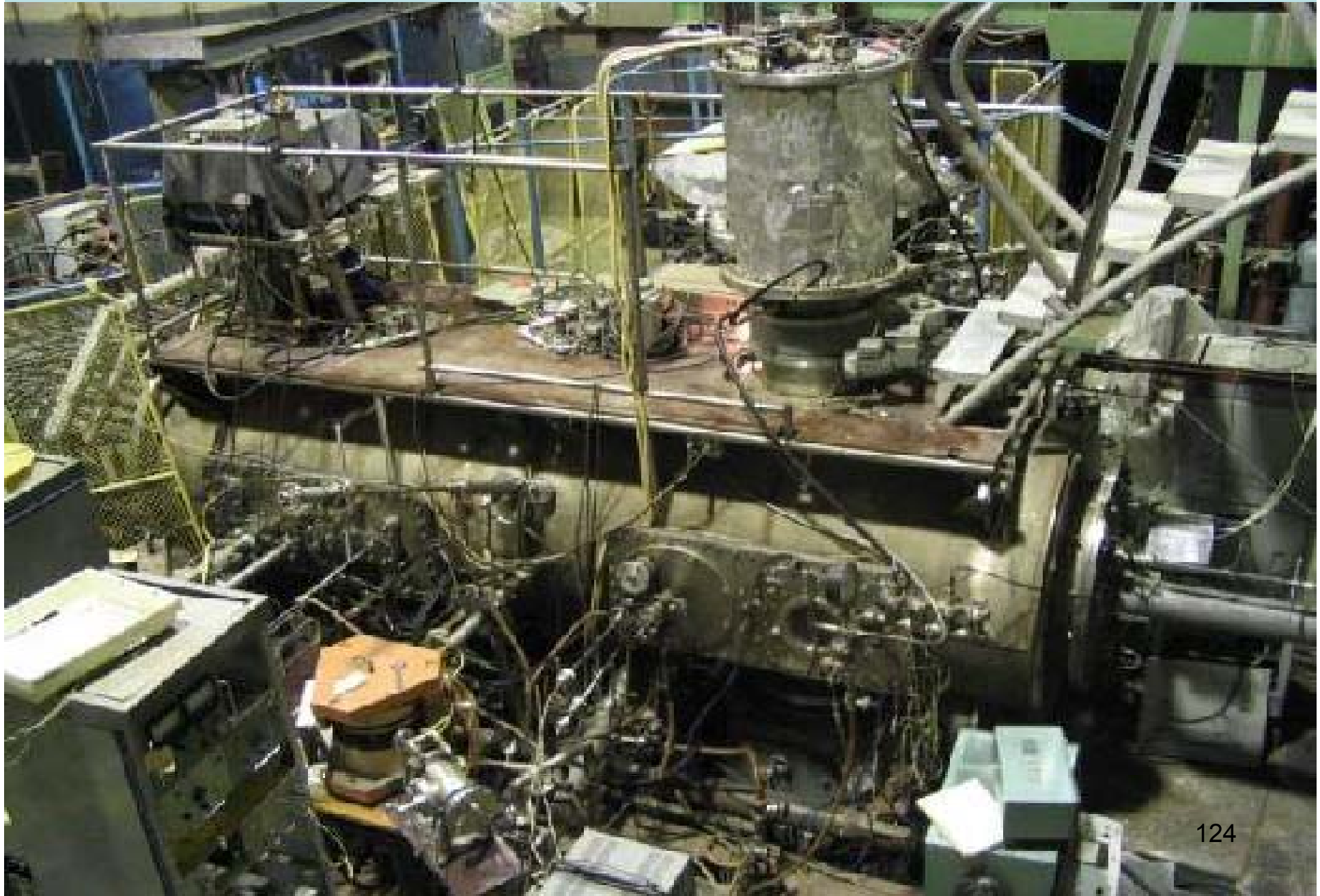
Проследив все этапы развития термоядерной энергетики от начала и до конца можно сделать вывод, что всё должно кончиться **пуском “настоящего” термоядерного реактора в начале XXI века,** хотя ещё предстоит пройти трудный путь.

Название	R, м	r, м	V, М ³	B, Тл	VB, М ³ Тл	W, МВт
Т - 3 Россия	1	0,15	0,5	3,5	1,8	нет
Т - 4 Россия	0,9	0,17	3,5	4,5	2,3	нет
Т - 7 Россия	1,2	0,35	1,8	2,5	7,5	1
Т - 10 Россия	1,5	0,37	0,5	4,5	19	4
Т - 15 Россия	2,4	0,7	4,5	3,5	85	14
ТСП Россия	1,06	0,29	2,3	2	3,6	2
PLT США	1,3	0,4	3	4,5	19	4
Doublett США	2,75	0,9	2,5	2,6	120	8
JT - 60 Япония	3	0,95	7,5	4,5	240	40
TFTR США	2,65	1,1	4	5,2	330	30
JET ЕВРАТОМ	2,95	1,7	4,5	3,4	580	52

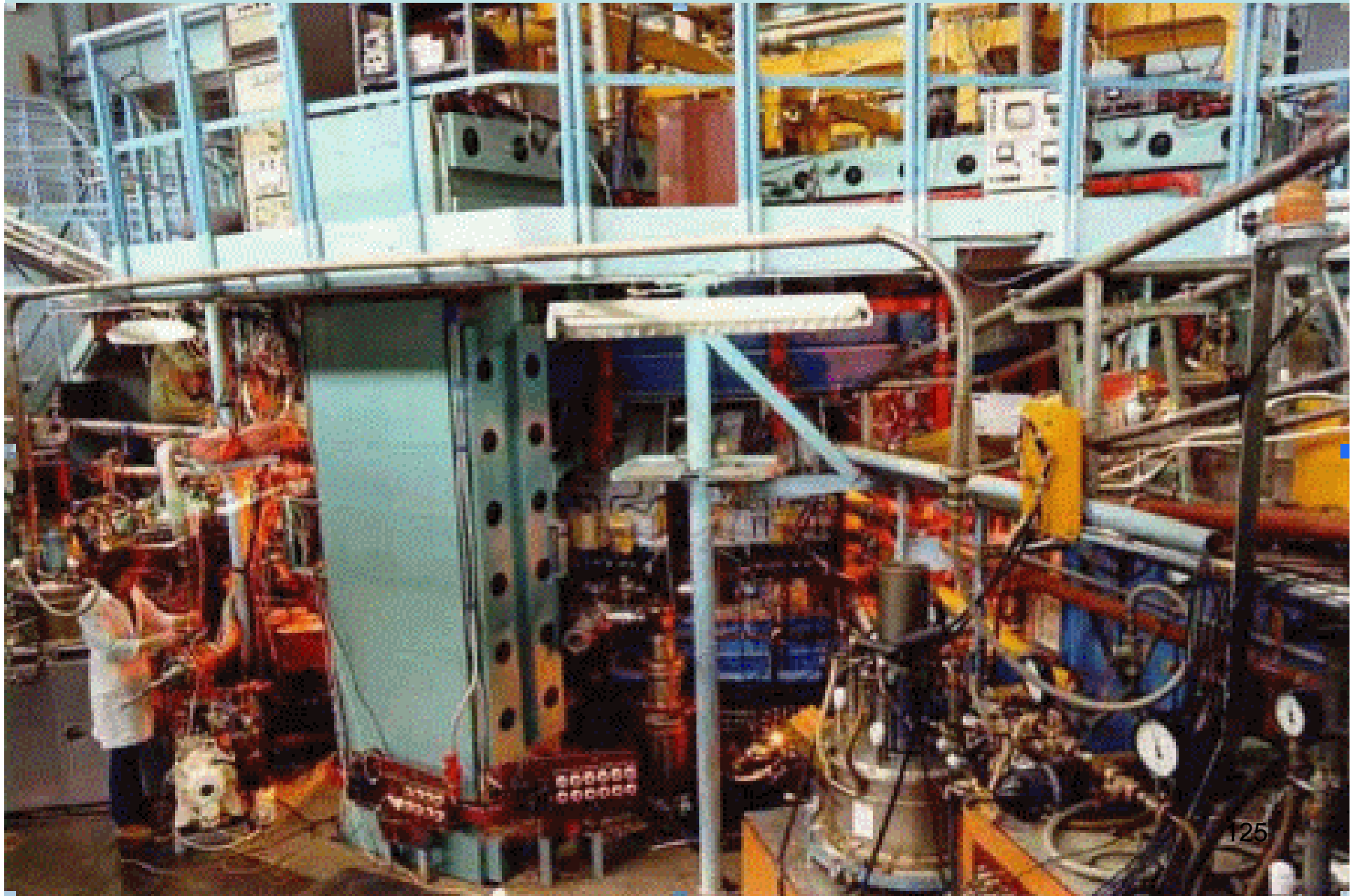
C 300



PN 3



T 10



T 15

