

# ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА АТОМА

Деление ядер

Ядерный реактор

Термоядерный синтез

Атомное ядро состоит из элементарных частиц - протонов и нейтронов . Атомные ядра имеют размеры примерно  $10^{-14}$ - $10^{-15}$  м.

Протон (p) имеет положительный заряд, равный заряду электрона, и массу покоя  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг  $\approx 1836 m_e$ , где  $m_e$  - масса электрона.

Нейтрон (n) - нейтральная частица с массой покоя  $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг  $\approx 1839 m_e$ .

Протоны и нейтроны называются нуклонами (от лат. nucleus - ядро).

Общее число нуклонов в атомном ядре называется **массовым числом  $A$** .

Атомное ядро характеризуется зарядом  $Ze$ , где  $Z$  - **зарядовое число** ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева.

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом:  ${}^A_ZX$ , где  $X$  - символ химического элемента,  $Z$  - атомный номер (число протонов в ядре),  $A$  - массовое число (число нуклонов в ядре).

Ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными  $A$  (т. е. с разными числами нейтронов  $N=A-Z$ ) называются **изотопами**, а ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  - **изобарами**.

Например, водород ( $Z=1$ ) имеет три изотопа:  ${}^1_1\text{H}$  - протий ( $Z=1, N=0$ ),  ${}^2_1\text{H}$  - дейтерий ( $Z=1, N=1$ ),  ${}^3_1\text{H}$  - тритий ( $Z=1, N=2$ ), олово - десять, и т. д.

В подавляющем большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами (исключение составляют, например, изотопы водорода).

Примером ядер-изобар могут служить ядра  ${}^{10}_4\text{Be}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{10}_6\text{C}$ .

В настоящее время известно более 2500 ядер, отличающихся либо  $Z$ , либо  $A$ , либо тем и другим.

Радиус ядра задается эмпирической формулой:

$$R = R_0 A^{1/3},$$

Атомные ядра являются устойчивыми образованиями. Это означает, что в ядре между нуклонами существует определенная связь.

Масса ядра ( $m_{\text{я}}$ ) всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом.

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2,$$

где  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_{\text{я}}$  - соответственно массы протона, нейтрона и ядра. Эта величина и есть **энергия СВЯЗИ** нуклонов в ядре.

В таблицах обычно приводятся не массы ядер, а массы атомов. Поэтому для энергии связи ядра пользуются формулой

$$E_{\text{св}} = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m]c^2,$$

где  $m_{\text{H}}$  - масса атома водорода.

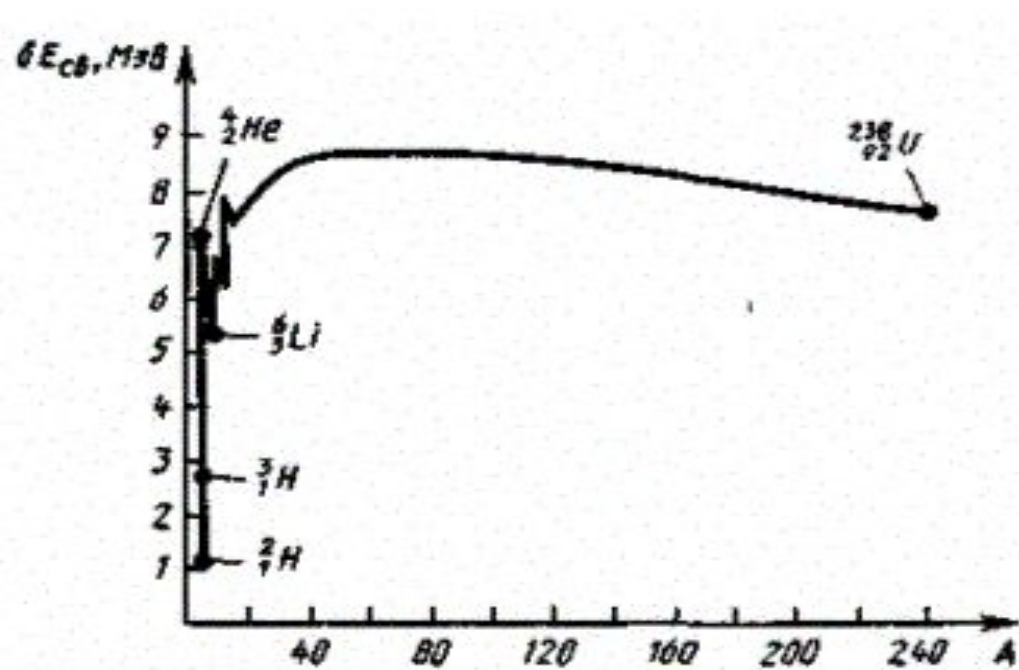
Величина  $\Delta m = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}}] - m_{\text{я}}$  называется **дефектом массы** ядра. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра. Часто вместо энергии связи рассматривают **удельную энергию связи**

$\delta E_{\text{св}} = E_{\text{св}} / A$  - энергию связи, отнесенную к одному нуклону. Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер, т. е. чем больше  $\delta E_{\text{св}}$ , тем устойчивее ядро. Удельная энергия связи зависит от массового числа  $A$  элемента.

Сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами 50-60 (т.е. от элементов от Cr до Zn). Энергия связи для этих ядер. Энергия связи для этих ядер достигает 8,7 МэВ/нуклон. С ростом  $A$  удельная энергия связи постепенно уменьшается. Для Урана составляет 7,5 МэВ/нуклон.

Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможным два процесса:

- 1) деление тяжелых ядер на несколько более легких,
- 2) Слияние (синтез) легких ядер в одно ядро.



Оба эти процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Деление одного ядра  $A=240$  на два ядра с массовыми числами  $A=120$  привело бы к высвобождению энергии 240 МэВ. Слияние двух ядер тяжелого водорода  ${}^2_1\text{H}$  в ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  привело бы к выделению энергии, равной 24 МэВ. (При соединении атома углерода с кислородом - сгорании угля выделяется порядка 5 эВ).

Для того чтобы разделиться на несколько частей, тяжелое ядро должно пройти ряд промежуточных состояний, энергия которых превышает энергию основного состояния ядра.

Следовательно, для процесса деления ядра требуется дополнительная энергия (энергия активации), которая затем возвращается обратно, приплюсовываясь к энергии, выделяющейся при делении за счет изменения энергии связи.

Энергия активации может быть сообщена тяжелому ядру захваченным им дополнительным нейтроном. Процесс деления ядер урана или плутония под действием захватываемых ядрами нейтронов лежит в основе действия ядерных реакторов и атомной бомбы.



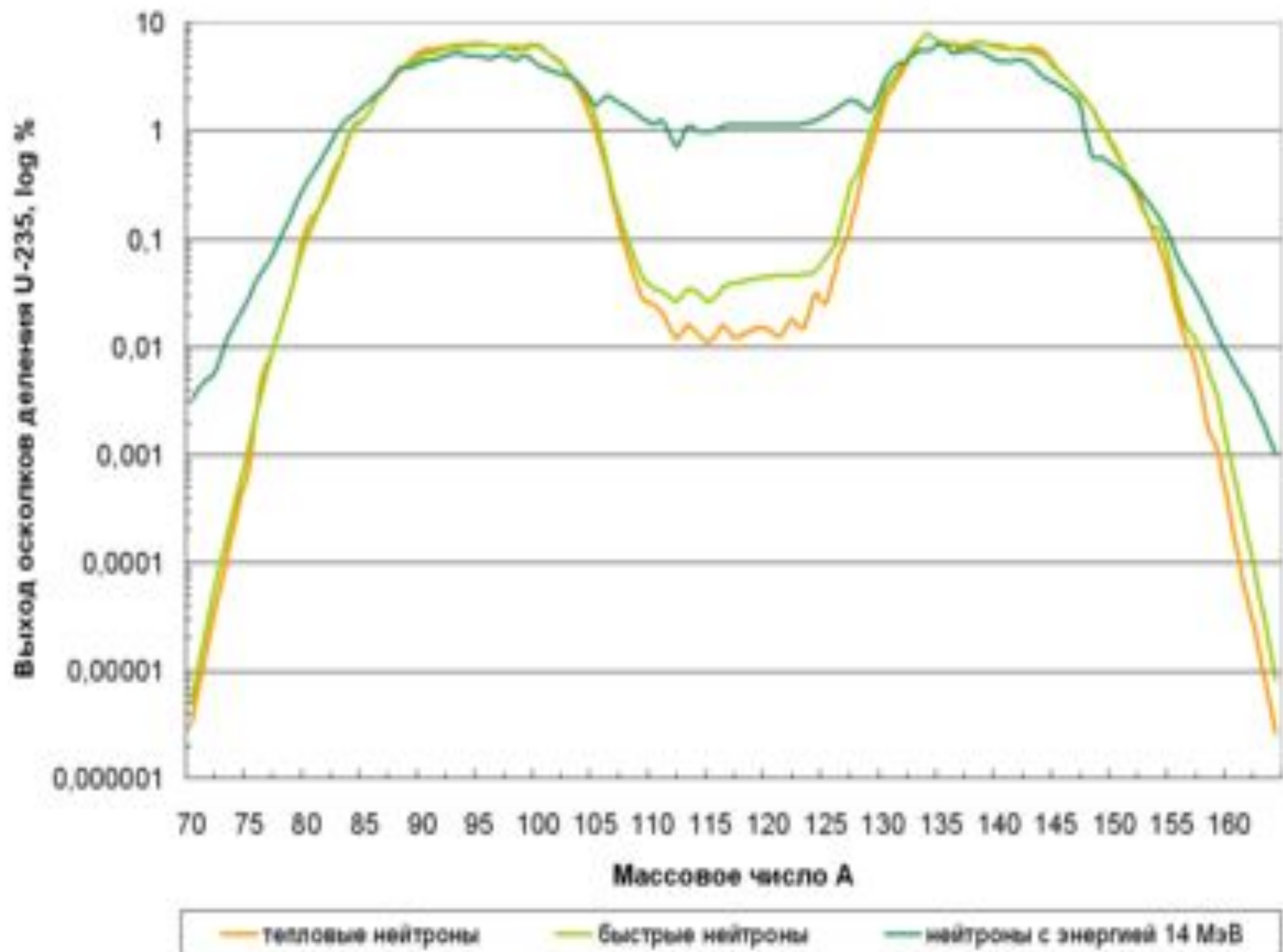
Для слияния легких ядер в одно они должны подойти друг к другу на весьма близкое расстояние ( $10^{-15}$  м).

Такому сближению препятствует кулоновское отталкивание между ядрами, преодолеть которое ядра могут только двигаясь с огромными скоростями, соответствующими температурам  $10^7$ - $10^8$  К.

По этой причине процесс синтеза легких ядер называется ***термоядерной реакцией***.

# Деление ядер

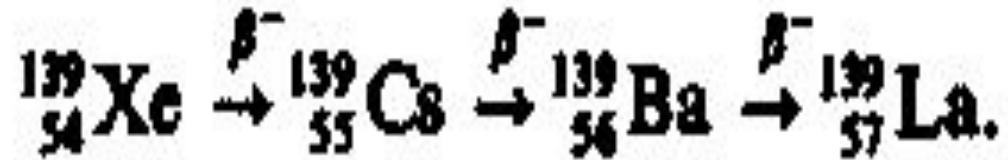
К началу 40-х годов 20 века работами многих ученых было доказано, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины Периодической системы. Деление может происходить разными путями с образованием около 80 различных осколков, причем наиболее вероятным является деление на осколки, массы которых относятся как 2:3



Пример деления ядра  $U_{235}$



В результате перегрузки образовавшихся ядер нейтронами, они оказываются радиоактивными и могут претерпевать ряд  $\beta^-$  - превращений.

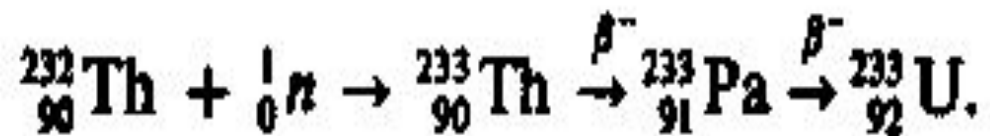


Поскольку осколки могут быть разнообразными, возможна, к примеру, такая реакция деления  $U_{235}$



В основу теории деления атомных ядер (Н. Бор, Я. И. Френкель) положена капельная модель ядра. Ядро рассматривается как капля электрически заряженной несжимаемой жидкости (с плотностью, равной ядерной, и подчиняющейся законам квантовой механики), частицы которой при попадании нейтрона в ядро приходят в колебательное движение, в результате чего ядро разрывается на две части, разлетающиеся с огромной энергией.

Вероятность деления ядер определяется энергией нейтронов. Например, если высокоэнергетичные нейтроны вызывают деление практически всех ядер, то нейтроны с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт - только тяжелых ядер ( $A > 210$ ). Нейтроны, обладающие энергией активации (минимальной энергией, необходимой для осуществления реакции деления ядра) порядка 1 МэВ, вызывают деление ядер урана  $^{238}_{92}\text{U}$ , тория  $^{232}_{90}\text{Th}$ , протактиния  $^{231}_{91}\text{Pa}$  и плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$ . Тепловыми нейтронами делятся ядра  $^{235}_{92}\text{U}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{233}_{92}\text{U}$ ,  $^{230}_{90}\text{Th}$  (два последних изотопа в природе не встречаются, они получают искусственным путем). Например, изотоп  $^{233}_{92}\text{U}$  получается в результате радиационного захвата (реакции  $(n, \gamma)$ , нейтронов ядром  $^{232}_{90}\text{Th}$ :



Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления, что делает возможным осуществление **цепной реакции** деления - ядерной реакции, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции. Цепная реакция деления характеризуется коэффициентом размножения  $k$  нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. Необходимым условием для развития цепной реакции деления является требование  $k \geq 1$ .

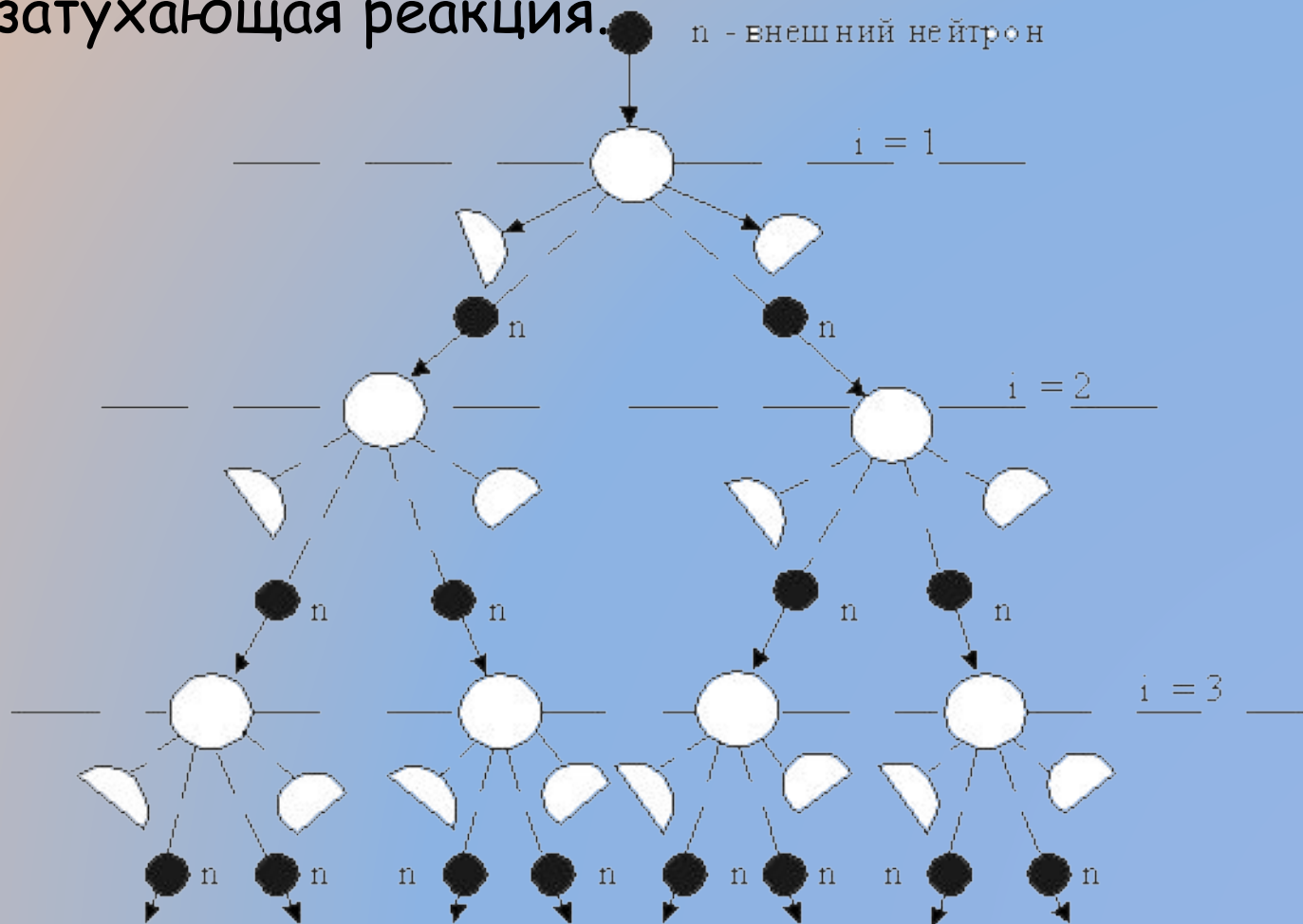
Пусть  $T$  - среднее время жизни одного поколения, а  $N$  - число нейтронов в данном поколении. В следующем поколении их число равно  $kN$ , т. е. прирост числа нейтронов за одно поколение  $dN = kN - N = N(k - 1)$ . Прирост же числа нейтронов за единицу времени, т. е. скорость нарастания цепной реакции

где  $N_0$  - число нейтронов в начальный момент времени, а  $N$  - их число в момент времени  $t$ .  $N$  определяется знаком  $(k - 1)$ .

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T}$$

$$N = N_0 e^{(k-1)t/T}$$

При  $k > 1$  идет развивающаяся реакция, число делений непрерывно растет и реакция может стать взрывной. При  $k = 1$  идет самоподдерживающаяся реакция, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется. При  $k < 1$  идет затухающая реакция.



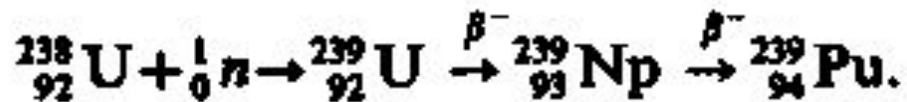
Цепной процесс деления тяжёлых ядер

**Цепные реакции** делятся на управляемые и неуправляемые. Взрыв атомной бомбы, например, является неуправляемой реакцией. Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней  $^{235}_{92}\text{U}$  (или  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ) делится на две или больше удаленные друг от друга части с массами ниже критических. Затем с помощью обычного взрыва эти массы сближаются, общая масса делящегося вещества становится больше критической и возникает взрывная цепная реакция, сопровождающаяся мгновенным выделением огромного количества энергии и большими разрушениями. Взрывная реакция начинается за счет имеющихся нейтронов спонтанного деления или нейтронов космического излучения.



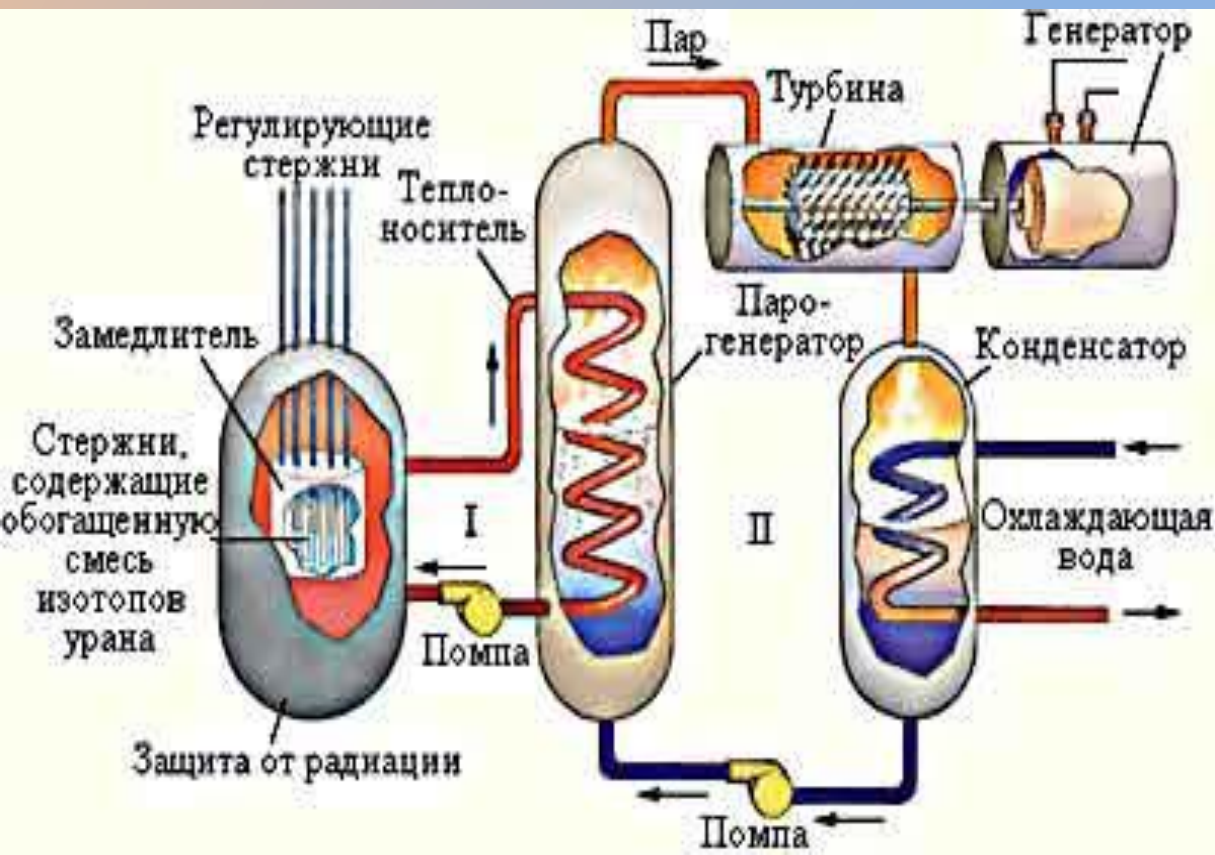


Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах. В природе имеется три изотопа, которые могут служить ядерным топливом ( $^{235}_{92}\text{U}$ : в естественном уране его содержится примерно 0,7%) или сырьем для его получения ( $^{232}_{90}\text{Th}$  и  $^{238}_{92}\text{U}$ : в естественном уране его содержится примерно 99,3%).  $^{232}_{90}\text{Th}$  служит исходным продуктом для получения искусственного ядерного топлива  $^{233}_{92}\text{U}$ , а  $^{238}_{92}\text{U}$ , поглощая нейтроны, посредством двух последовательных  $\beta^-$ -распадов - для превращения в ядро  $^{239}_{94}\text{Pu}$ :



Большое значение в ядерной энергетике приобретает не только осуществление цепной реакции деления, но и управление ею. Устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления, называются **ядерными реакторами**. Пуск первого реактора в мире осуществлен в Чикагском университете (1942) под руководством Э. Ферми, в России (и в Европе) - в Москве (1946) под руководством И. В. Курчатова

Реактор работает на медленных нейтронах (более эффективно идет деление ядер урана-235).  
Активная зона реактора, содержит ядерное топливо - урановые стержни и замедлитель - воду. Вода вокруг урановых стержней является не только замедлителем нейтронов, но и служит для отвода тепла, т.к. внутренняя энергия разлетающихся осколков переходит во внутреннюю энергию окружающей среды - воды.



Активная зона  
окружена  
отражателем для  
возвращения  
нейтронов и  
защитным слоем  
бетона.

Достижение критической массы топлива осуществляется введением регулирующих стержней.

Активная зона посредством труб соединена в кольцо (1-ый контур).

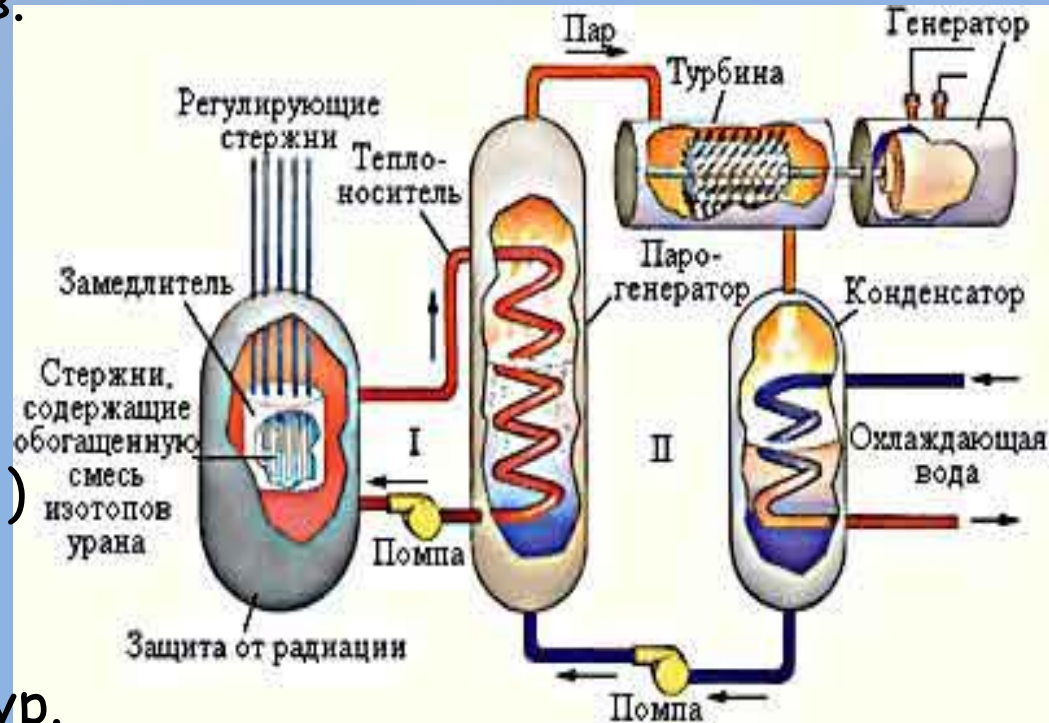
Вода прокачивается по трубам контура насосом и отдает свою энергию змеевику в теплообменнике, нагревая воду в змеевике (во 2-м контуре).

Вода в змеевике превращается в пар, температура которого может достигать 540 градусов.

Пар вращает турбину, энергия пара превращается в механическую энергию.

Ось турбины вращает ротор электрогенератора.

Отработанный (охлажденный) пар поступает в конденсатор, где превращается в воду, возвращающуюся в 1-ый контур.



Управление реакцией осуществляется специальными управляющими стержнями из материалов, сильно поглощающих нейтроны. В реакторе имеются также аварийные стержни, введение которых при внезапном увеличении интенсивности реакции немедленно ее обрывает.

Ядерный реактор является мощным источником проникающей радиации (нейтроны,  $\gamma$ -излучение), примерно в  $10^{11}$  раз превышающей санитарные нормы. Поэтому любой реактор имеет биологическую защиту - систему экранов из защитных материалов (например, бетон, свинец, вода).

Ядерные реакторы различаются:

- по характеру основных материалов, находящихся в активной зоне (ядерное топливо, замедлитель, теплоноситель); в качестве делящихся и сырьевых веществ используются  $^{235}_{92}\text{U}$ ,  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{233}_{92}\text{U}$ ,  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{232}_{90}\text{Th}$ , в качестве замедлителей - вода (обычная и тяжелая), графит, бериллий, органические жидкости и т. д., в качестве теплоносителей - воздух, вода, водяной пар, He, CO<sub>2</sub> и т. д.;
- по характеру размещения ядерного топлива и замедлителя в активной зоне: гомогенные (оба вещества равномерно смешаны друг с другом) и гетерогенные (оба вещества располагаются порознь в виде блоков);
- по энергии нейтронов (реакторы на тепловых и быстрых нейтронах; в последних используются нейтроны деления и замедлитель вообще отсутствует);
- по типу режима (непрерывные и импульсные);
- по назначению (энергетические, исследовательские, реакторы по производству новых делящихся материалов, радиоактивных изотопов и т. д.).

В соответствии с рассмотренными признаками и образовались такие названия, как *уран-графитовые, водо-водяные, графито-газовые* реакторы и др.

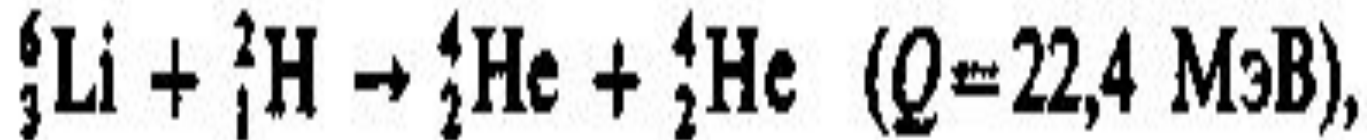
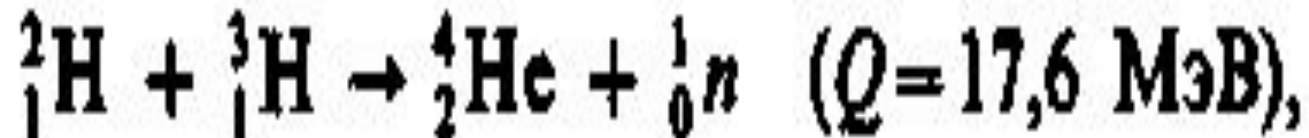
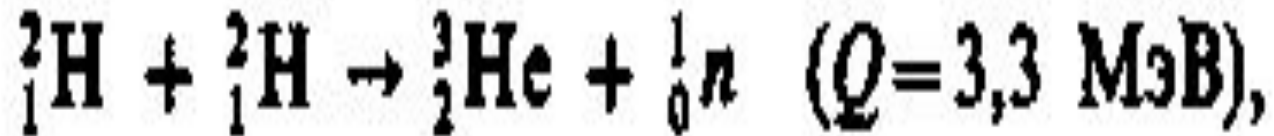
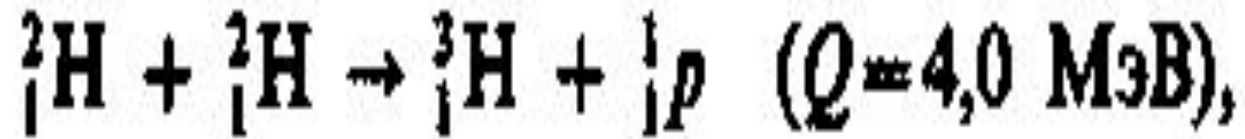
Среда ядерных реакторов особое место занимают энергетические *реакторы-размножители*. В них наряду с выработкой электроэнергии идет процесс воспроизводства ядерного горючего в результате реакции или. Это означает, что в реакторе на естественном или слабообогащенном уране используется не только изотоп  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , но и изотоп  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . В настоящее время основой ядерной энергетики с воспроизводством горючего являются реакторы на быстрых нейтронах.

# Реакция синтеза атомных ядер. Термоядерные реакции

Источником огромной энергии может служить реакция синтеза атомных ядер - образование из легких ядер более тяжелых. Удельная энергия связи ядер резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода (дейтерия и трития) к литию Li и особенно к гелию He, т.е. реакции синтеза легких ядер в более тяжелые должны сопровождаться выделением большого количества энергии, что действительно подтверждается расчетами.

Реакции синтеза атомных ядер обладают той особенностью, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно больше, чем в реакциях деления тяжелых ядер. В самом деле, если при делении ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$  выделяется энергия примерно 200 МэВ, что составляет на один нуклон примерно 0,84 МэВ, то в реакции синтеза эта величина равна  $17,6/5 \text{ МэВ} \approx 3,5 \text{ МэВ}$ .

# Примеры реакций синтеза



Где Q - энергосвободное



Если оценить температуру, необходимую для протекания реакции синтеза. Исходя из того, что ядра должны приблизиться на расстояние  $2 \cdot 10^{-15}$  м, преодолев потенциальную энергию кулоновского отталкивания  $\approx 0,7$  МэВ, то получится температура порядка  $10^9$  К. Тогда как даже центральные области Солнца имеют температуру примерно  $1,3 \cdot 10^7$ .

Однако оказывается, что для протекания реакции синтеза достаточно температуры порядка  $10^7$  К.

Это связано с двумя факторами:

- 1) при температурах, характерных для реакций синтеза атомных ядер, любое вещество находится в состоянии плазмы, распределение частиц которой подчиняется закону Максвелла; поэтому всегда имеется некоторое число ядер, энергия которых значительно превышает среднее значение;
- 2) синтез ядер может происходить вследствие туннельного эффекта.

Реакции синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверх высоких температурах (примерно  $10^7$  К и выше), называются **термоядерными реакциями**.

Термоядерные реакции являются, по-видимому, одним из источников энергии Солнца и звезд. В принципе высказаны два предположения, о возможных способах протекания термоядерных реакций на Солнце:

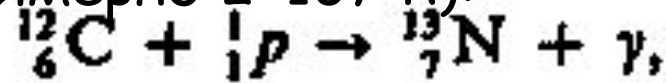
1) протонно-протонный, или водородный, цикл, характерный для температур (примерно  $10^7$  К):



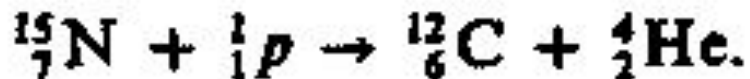
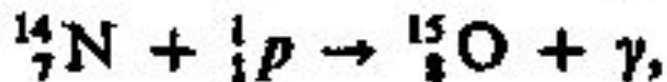
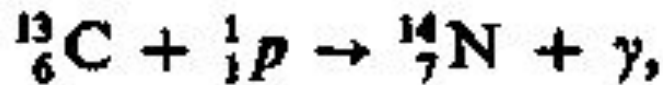
2) углеродно-азотный, или углеродный, цикл,



характерный для более высоких температур (примерно  $2 \cdot 10^7$  К):



В результате этого цикла четыре протона превращаются в ядро гелия и выделяется энергия, равная 26,7 МэВ. Ядра же углерода, число которых остается неизменным, участвуют в реакции в роли катализатора.



Термоядерные реакции дают наибольший выход энергии на единицу массы «горючего», чем любые другие превращения, в том числе и деление тяжелых ядер. Например, количество дейтерия в стакане простой воды энергетически эквивалентно примерно 60 л бензина. Поэтому заманчива перспектива осуществления термоядерных реакций искусственным путем. Впервые искусственная термоядерная реакция осуществлена в нашей стране (1953), а затем (через полгода) в США в виде взрыва водородной (термоядерной) бомбы, являющегося неуправляемой реакцией. Взрывчатым веществом служила смесь дейтерия и трития, а запалом - «обычная» атомная бомба, при взрыве которой возникает необходимая для протекания термоядерной реакции температура. Управляемый термоядерный синтез открывает человечеству доступ к неисчерпаемой «кладовой» ядерной энергии, заключенной в легких элементах.

# Литература

• И.В. Савельев, Курс общей физики, том 2. Электричество, волны, оптика. М. Наука, 1982 г.