

Атомное ядро. Ядерные реакции.

В опытах Резерфорда по рассеянию α -частиц было показано, что при прохождении через тонкую золотую фольгу практически все α -частицы рассеиваются на углы порядка 1° (наиболее вероятный угол отклонения α -частиц составлял $0,87^\circ$), однако что часть α -частиц, хотя и небольшая, рассеивается на углы $> 90^\circ$. Анализ экспериментов убедил Резерфорда в том, что наблюдавшиеся случаи отклонения α -частиц на большие углы могли быть результатом только однократного рассеяния, а не накопления большого числа рассеяний на малые углы. Следовательно, в центре атома должно существовать массивное образование, несущее заряд и обладающее размерами, много меньшими размеров атома. **Так состоялось открытие атомного ядра.**

В 1919 г. Резерфордом был открыт протон (от греч. *protos* – первый, первичный), а в 1932 г. Чадвиком был открыт нейтрон (от лат. *neutron* – ни тот, ни другой, нейтральный).

Состав атомного ядра

Ядра атомов состоят из двух видов элементарных частиц — протонов и нейтронов. Эти частицы носят название нуклонов. Протон (p) — элементарная частица, которая обладает зарядом $+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и массой $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг.

Масса может быть выражена в единицах энергии, т.е. $m = mc^2$:

$$m_p = 938,2 \text{ Мэв.}$$

Для сравнения укажем, что масса электрона, составляет

$$m_e = 0,511 \text{ Мэв.}$$

Из сопоставления (1) и (2) следует, что $m_p = 1836 m_e$.

Нейтрон — элементарная частица, заряд которой равен нулю, а масса очень близка к массе протона

$$m_n = 939,5 \text{ Мэв,}$$

Разность масс нейтрона и протона составляет 1,3 Мэв, т. е. $2,5 m_e$.

Протоны и нейтроны имеют общее название — нуклоны.

Характеристика атомного ядра.

Количество протонов Z , входящих в состав ядра, определяет его заряд, который равен Ze . Число Z называется атомным номером (оно определяет порядковый номер химического элемента в периодической таблице Менделеева) **или зарядовым числом ядра. Число нуклонов A (т. е. суммарное число протонов и нейтронов) в ядре называется массовым числом ядра.** Число нейтронов в ядре равно $N = A - Z$

Для обозначения ядер применяется символ где под X подразумевается химический символ данного элемента. Справа сверху ставится массовое число, слева внизу — атомный номер (последний значок часто опускают).

Большинство химических элементов имеет по несколько разновидностей — изотопов, отличающихся значениями массового числа A . Так, например, водород имеет три изотопа:

${}_1^1\text{H}$ — обычный водород, или протий ($Z=1, N=0$),

${}_1^2\text{H}$ — тяжелый водород, или дейтерий ($Z=1, N=1$),

${}_1^3\text{H}$ — тритий ($Z=1, N=2$).

Размеры и плотность атомного ядра

Все атомы имеют примерно одинаковые размеры, составляющие от **0,1 до 0,3 нм**, т. е. 2 - 6 боровских радиусов. Исключение составляет водород, радиус которого $r_0 = 0,053$ нм.

Говоря о размерах ядра, надо, конечно, всегда иметь в виду, что это довольно условная величина, т.к. ядро, как любая квантовомеханическая система, не имеет определенной границы в силу соотношения неопределенностей. Тем не менее, во многих практически важных случаях ядро можно представлять себе в виде совокупности «плотно упакованных» нуклонов, имеющей форму шара с радиусом R_y .

$$R_y = 1,2 A^{1/3} \text{ фм}$$

где A — массовое число.

Плотность нуклонов внутри ядра ρ

$$\rho = \frac{M_{\text{я}}}{(4/3)\pi R_{\text{я}}^3} = \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ А}}{(4/3)\pi (1,2)^3 \text{ А}} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ кг / м}^3.$$

Она постоянна вплоть до $0,7 R_0$, после чего приблизительно линейно спадает до нуля при $1,3 R_0$ (см. рис. 1).

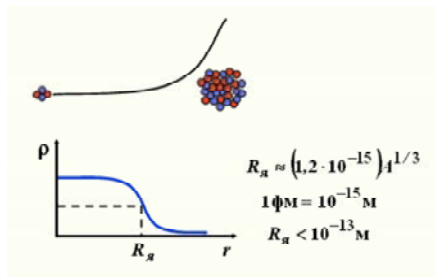


Рис.1

Как правило, нуклоны распределены в ядре сферически симметрично. Вместе с тем, известны случаи, когда распределение заряда в ядре имеет удлиненную или уплощенную форму, соответствующую вытянутым или сплюснутым эллипсоидам.

Физическая природа сил, действующих внутри ядра

Силой, обеспечивающей устойчивую структуру атомов, является **кулоновское притяжение** отрицательно заряженных электронов к положительно заряженному ядру.

1. Ядерные силы

Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате т.н. ядерных сил, которые являются проявлением наиболее интенсивного из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц — сильного взаимодействия.

Наличие такого взаимодействия было подтверждено опытами Резерфорда по рассеянию α -частиц на ядрах легких атомов. На расстояниях пролета α -частицы от ядра, больших 3 фм ($1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$), наблюдалось кулоновское расталкивание, а на расстояниях, меньших 3 фм , - притяжение протонов. Размер протона $\sim 1 \text{ фм}$. Именно это расстояние является характерным для области сильного взаимодействия.

Опыт показывает, сильные взаимодействия не влияют на электроны и не зависят от заряда частиц. Они примерно одинаковы для любой пары нуклонов (протон-протон, нейтрон-нейтрон, протон-нейтрон), так что по отношению к ядерным взаимодействиям протоны и нейтроны тождественны. Именно поэтому им дано общее название — «нуклоны». Из опыта следует также, что ядерные силы можно считать потенциальными, причем на расстояниях порядка $2-0,4 \text{ фм}$, нуклоны притягиваются друг к другу, а на расстояниях, меньших $0,4 \text{ фм}$, — сильно отталкиваются.

Согласно квантовой теории поля ядерные силы обусловлены обменом мезонами между нуклонами ядра. Нуклон на короткое время (как говорят, виртуально) испускает мезон, который поглощается соседним нуклоном. В свою очередь, этот второй нуклон испускает мезон, который поглощается первым. Такой «обмен» мезонами и приводит к возникновению взаимодействия между нуклонами — к ядерным силам.

2. Кулоновские силы

Положительно заряженные протоны расталкиваются внутри ядра, противодействуя сильному взаимодействию, благодаря которому осуществляется связь между нуклонами. Это отталкивание начинает играть существенную роль на расстояниях, больших нескольких фемтометров и служит причиной того, что более тяжелые атомы периодической системы элементов по мере роста атомного номера оказываются менее устойчивыми.

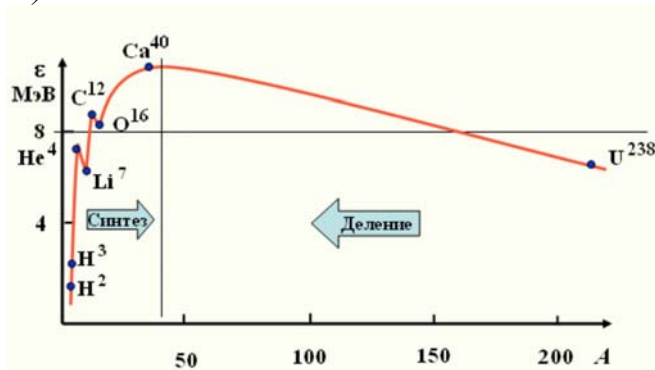
Масса и энергия связи ядра

Масса ядра всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом. Энер-

гия связи равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом. Таким образом, энергия ядра меньше энергии системы не взаимодействующих нуклонов на величину, равную $E_{\text{св}}$. Согласно закону взаимосвязи массы и энергии, уменьшение энергии тела на ΔE должно сопровождаться эквивалентным уменьшением массы тела на $\Delta m = \Delta E/c^2$. Следовательно, энергия в связи нуклонов в ядре равна: $E_{\text{св}} = \Delta mc^2$.

Для сравнения приведем некоторые цифры:

$E_{\text{св}}$ ядра нуклонов в ядре гелия = 28,4 Мэв, в расчете на 1 нуклон – 7.1 Мэв, энергия связи валентных электронов в атомах имеет величину в 10^6 раз меньшую (порядка 10 эв).



Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра или ядер

На рис. 1 изображен график, показывающий зависимость $\epsilon = E_{\text{св}}/A$ от массового числа A . Сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами порядка 50—60 (т. е. для элементов от Cr до Zn). Энергия связи для этих ядер достигает 8,7 Мэв/нуклон. С ростом A удельная энергия связи постепенно уменьшается; для самого тяжелого природного элемента — урана она составляет 7,5 Мэв/нуклон. Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможными два процесса:

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

Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Так, например, деление одного ядра с массовым числом $A = 240$ Мэв (удельная энергия связи равна 7,5 Мэв) на два ядра с массовыми числами $A = 120$ (удельная энергия связи равна 8,5 Мэв) привело бы к высвобождению энергии в 240 Мэв.

Слияние двух ядер тяжелого водорода ${}^1_1\text{H}^2$ в ядро гелия ${}^2_1\text{H}^4$ привело бы к выделению энергии, равной ~ 24 Мэв. Для сравнения укажем, что при соединении одного атома углерода с двумя атомами кислорода (сгорание угля до CO_2) выделяется энергия, равная ~ 5 эв. Сгорание одного атома углерода приводит к выделению энергии 5эв.

Таким образом, реакция деления тяжелых ядер и слияния легких ядер служит мощным источником энергии. Однако для того, чтобы эта энергия выделилась, необходимо создание специальных условий.

Для того чтобы разделиться на несколько частей, тяжелое ядро должно пройти через ряд промежуточных состояний, энергия которых превышает энергию основного состояния ядра. Следовательно, для процесса деления ядру требуется дополнительная энергия (энергия активации), которая затем возвращается обратно, приплюсовываясь к энергии, выделяющейся при делении за счет изменения энергии связи. В обычных условиях ядру неоткуда взять энергию активации, вследствие чего тяжелые ядра не претерпевают спонтанного деления. Энергия активации может быть сообщена тяжелому ядру захваченным им дополнительным нейтроном.

Что касается легких ядер, то для слияния их в одно ядро они должны подойти друг к другу на весьма близкое расстояние ($\sim 10\sim 13$ см). Такому сближению ядер препятствует кулоновское отталкивание между ними. Для того чтобы преодолеть это отталкивание, ядра должны двигаться с огромными скоростями, соответствующими температурам порядка нескольких сот миллионов градусов. По этой причине процесс синтеза легких ядер называется термоядерной реакцией. Термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и звезд. В земных условиях пока были осуществлены неуправляемые термоядерные реакции при взрывах водородных бомб.

Т. о., для возбуждения ядерных реакций необходимы элементарные частицы или другие легкие ядра. Источником таких частиц или легких ядер могут служить радиоактивные элементы.

Радиоактивность

Радиоактивностью называют самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер.

неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотоп другого элемента, Радиоактивность, наблюдающаяся у веществ, существующих в природных условиях, называется естественной. Радиоактивность веществ, полученных посредством ядерных реакций, называется искусственной. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одинаковым законам.

Закон радиоактивного превращения

Скорость убывания числа атомов радиоактивного вещества вследствие их распада можно рассчитать следующим образом. Т.к. распад отдельных ядер происходит независимо друг от друга, то число распавшихся за время dt атомов будет пропорционально числу атомов N и промежутку dt :

$$dN = -N\lambda dt, \quad (1)$$

проинтегрировав (1), получим

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt, \ln N - \ln N_0 = -\lambda dt, \quad (2)$$

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

где N_0 - количество нераспавшихся атомов в начальный момент, N — количество нераспавшихся атомов в момент времени t , λ — характерная для радиоактивного вещества константа, называемая постоянной распада, характеризующая вероятность распада в единицу времени. Таким образом, число радиоактивных атомов убывает со временем по экспоненциальному закону. Заметим, что количество распавшихся за время t атомов определяется выражением:

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda dt}). \quad (3)$$

Время, за которое распадается половина первоначального количества атомов, называется периодом полураспада T . Величина T определяется условием:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T}, \quad (4)$$

Откуда прологарифмировав (1), получим:

$$-\ln 2 - \lambda T, \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (5)$$

Период полураспада для известных в настоящее время радиоактивных веществ колеблется в пределах от $3 \cdot 10^{-7}$ сек до $5 \cdot 10^{15}$ лет.

После обнаружения естественной радиоактивности (открыта в 1896 г. французским ученым А. Беккерелем) было обнаружено, что радиоактивное излучение неоднородно по своему составу и представляет собой смесь потоков α частиц, β частиц и жесткого рентгеновского излучения (электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda \leq 1 \text{ \AA}$). Соответственно

эти потоки называли α , β и γ – лучами. Как оказалось, α частицы – это полностью ионизированные атомы гелия, β частицы – это электроны, а γ – лучи – это жесткое электромагнитное излучение.

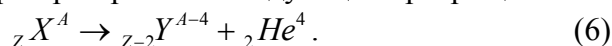
Принадлежность ядра атома тому или иному химическому элементу в таблице Менделеева определяется зарядом ядра, т.е. числом Z (атомный номер). В то же время, как установлено из опыта, могут существовать ядра с одинаковыми Z , но с различными атомными числами A (массами), что имеет место из-за различного числа нейтронов в них.

Ядра с одинаковыми Z (зарядами), но с различными A (массами), называются изотопами.

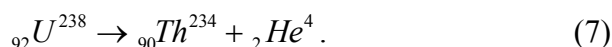
В природе встречаются атомы с атомным номером Z от 1 до 92. Ядра с большими номерами Z являются нестабильными и в природе практически не встречаются, но могут быть получены искусственным путем. Всякий химический элемент может иметь стабильные и нестабильные изотопы. Стабильные изотопы могут жить практически неограниченное время. Нестабильные изотопы через некоторое время претерпевают те или иные превращения вследствие радиоактивности.

Рассмотрим наиболее типичные **виды радиоактивного распада, наблюдаемые на опыте.**

Альфа (α)-распад представляет собой испускание ядром исходного атома α - частицы (атома гелия). При этом ядро претерпевает следующие превращения.



Буквой X обозначен химический символ распадающегося (материнского) ядра, буквой Y — химический символ образующегося (дочернего) ядра. Как видно из схемы, атомный номер дочернего вещества на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы меньше, чем у исходного вещества. Примером может служить распад изотопа урана U^{238} , протекающий с образованием тория:



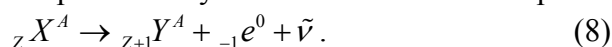
Скорости, с которыми α -частицы (т. е. ядра вылетают из распавшегося ядра, очень велики ($\sim 10^9$ см/сек; кинетическая энергия порядка нескольких Мэв).

Альфа-распад может сопровождаться испусканием γ - лучей, причина возникновения которых в том, что дочернее ядро может возникать не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях.

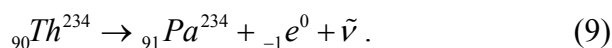
Пролетая через вещество, α -частица постепенно теряет свою энергию, затрачивая ее на ионизацию молекул вещества, и, в конце концов, останавливается. На образование одной пары ионов в воздухе тратится в среднем 35 эв. Таким образом, α -частица образует на своем пути примерно 10^5 пар ионов. Естественно, что чем больше плотность вещества, тем меньше пробег α -частиц до остановки. Так, в воздухе при нормальном давлении пробег составляет несколько сантиметров, в твердом веществе пробег достигает всего нескольких десятков микрон (α -частицы полностью задерживаются обычным листом бумаги). Кинетическая энергия α -частиц возникает за счет избытка энергии покоя (энергии связи) материнского ядра над суммарной энергией покоя дочернего ядра и α -частицы. Эта избыточная энергия распределяется между α -частицей и дочерним ядром в отношении, обратно пропорциональном их массам).

Бета (β)-распад. Существуют три разновидности β -распада.

1) **электронный распад**. В этом случае ядро атома испускает электрон, и его атомный номер возрастает на 1. Наряду с электроном испускается также антинейтрино $\bar{\nu}$:

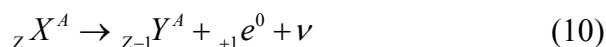


Бета-распад может сопровождаться испусканием γ -лучей. Причина их возникновения та же, что и в случае α -распада, — дочернее ядро возникает не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях. Переходя затем в состояние с меньшей энергией, ядро высвечивает γ - фотон. В качестве примера β -распада можно привести превращение тория Th^{234} в протактиний Pa^{234} с испусканием электрона и антинейтрино:

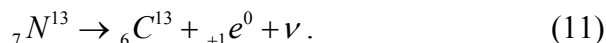


В отличие от α -частиц, обладающих в пределах каждой группы строго определенной энергией, β -электроны обладают самой разнообразной энергией от 0 до E_{\max} .

2) позитронный распад заключается в испускании позитрона и протекает по следующей схеме:



В качестве примера можно привести превращение азота N^{13} в углерод C^{13} :



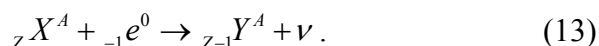
Процесс сопровождается испусканием позитрона ${}_{+1}\text{e}^0$ и нейтрино ν , возможно также возникновение γ -лучей. Позитрон является античастицей для электрона. Следовательно, обе частицы, испускаемые при распаде (9), представляют собой античастицы по отношению к частицам, испускаемым при распаде (8).

3) электронный захват (К, L, М – захват)

Третий вид β -распада заключается в том, что ядро поглощает один из электронов своего атома, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:



Возникшее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Переходя затем в более низкие энергетические состояния, оно испускает γ -фотоны. Схема процесса выглядит следующим образом:



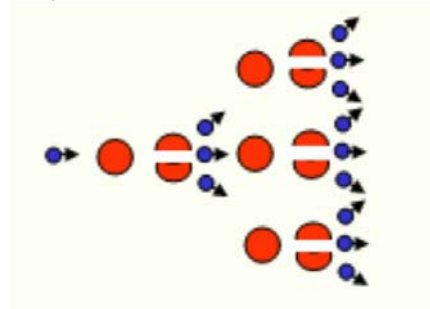
Обычно поглощается один из К (реже один из L- или М) –электронов. Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникают рентгеновские лучи. К-захват легко обнаруживается по сопровождающему его рентгеновскому излучению. Именно этим путем и был открыт К-захват Альваресом в 1937 г.

Примером К-захвата может служить превращение калия K^{40} в аргон Ar^{40} :



Цепная реакция деления ядер

В 1938 г. немецкие ученые О. Ган и Ф. Штрассман обнаружили, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины периодической системы — барий и лантан. Объяснение этого явления было дано немецкими учеными О. Фришем и Лизой Мейтнер. Они предположили, что захватившее нейтрон ядро урана делится на две примерно равные части, получившие название осколков деления. Реакция деления наблюдается для ядер (U^{235} , U^{239} , Pu^{239}) Но особенно важным оказалось то обстоятельство, что при делении каждого ядра высвобождается несколько нейтронов. Эти нейтроны, в свою очередь, попадая в другие атомы, вызывают их деление. Таким образом осуществляется цепная реакция.



Коэффициент размножения нейтронов

$$K = \frac{N_{i+1}}{N_i}$$

$$K \geq 1$$

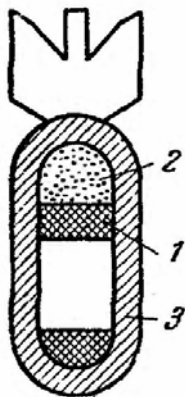
Суть этой реакции в том, что если взять некоторый объем указанных веществ, то вследствие спонтанного распада какого-либо атома под действием нейтрона космического происхождения происходит распад атома с выделением нескольких нейтронов. Эти нейтро-

ны попадают в другие атомы и вызывают их деление, и т.д. Причем число нейтронов и образовавшихся атомов будет нарастать в геометрической прогрессии. На самом деле процесс протекает не так идеально, т.к. часть нейтронов поглощается примесями, часть выходит за пределы объема, заполненного делящимися атомами и т.о. выбывает из дальнейшей реакции.

Т.к. объем тела пропорционален R^3 , а площадь поверхности – R^2 , то доля нейтронов, вылетевших за пределы объема, с ростом R (с ростом массы делящегося вещества) уменьшается. Поэтому начиная с некоторого объема, число нейтронов, выделяющихся при делении, становится больше, чем число нейтронов, теряемых за счет всех возможных факторов, т.е., коэффициент размножения становится >1 . Такая масса вещества (U^{235} , U^{239} , Pu^{239}) называется критической массой. Для U^{235} по вычислениям немецкого физика В. Гейзенберга критическая масса примерно равна 9 кг).

Цепная реакция деления ядер положена в основу действия атомной бомбы.

Ядерный заряд такой бомбы представляет собой два или более кусков почти чистого U^{235} или Pu^{239} (на рис.2 они обозначены цифрой 1). Масса каждого куска меньше критической, вследствие чего цепная реакция не возникает. В земной атмосфере всегда имеется некоторое количество нейтронов, рожденных космическими лучами. Поэтому, чтобы вызвать взрыв, достаточно соединить части ядерного заряда в один кусок с массой, большей критической. Это нужно делать очень быстро и соединение кусков должно быть очень плотным. В противном случае ядерный заряд разлетится на части прежде, чем успеет прореагировать заметная доля делящегося вещества. Для соединения используется обычное взрывчатое вещество 2 (запал), с помощью которого одной частью ядерного заряда выстреливают в другую. Все устройство заключено в массивную оболочку 3 из металла большой плотности. Оболочка служит отражателем нейтронов и, кроме того, удерживает ядерный заряд от распыления до тех пор, пока максимально возможное число его ядер не выделит свою энергию при делении. Цепная реакция в атомной бомбе идет на быстрых нейтронах. При взрыве успевает прореагировать только часть ядерного заряда.



При ядерном взрыве температура в зоне реакции может достигать нескольких миллионов градусов. При таких условиях может реализовываться реакция синтеза. Т.е. вследствие огромной кинетической энергии ядра дейтерия могут сблизиться, несмотря на кулоновское отталкивание, настолько, что сольются, образовав атом гелия. На этом принципе основано действие водородной бомбы, где ядерный заряд используется в качестве запала.

В атомной и водородной бомбах используется неуправляемая цепная реакция деления и реакция синтеза ядер.

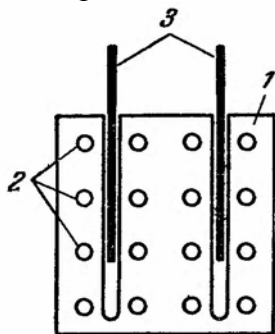
В ядерных реакторах реализуется управляемая цепная реакция. В настоящее время во многих странах ведутся работы по созданию управляемого термоядерного синтеза.

Ядерные реакторы

Управляемая цепная реакция деления ядер осуществляется в ядерных реакторах, которые используются на атомных тепловых и электрических станциях, а также в качестве энергетических установок кораблей, подводных лодок, космических объектов, и т.д.

Оказалось, что нейтроны, испускаемые при делении ядер урана, имеют высокую энергию (их называют быстрыми). В то же время, если их кинетическую энергию существенно понизить, то эти нейтроны перестают поглощаться ядрами U^{238} и начинают поглощаться ядрами U^{235} с последующим делением. Поэтому ядерный реактор (уран-графитовый) имеет следующее устройство.

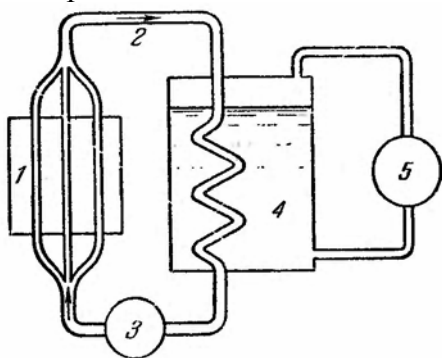
Первый уран-графитовый реактор был пущен в декабре 1942 г. в Чикагском университете под руководством выдающегося итальянского физика Э. Ферми. На рис. 3 показана схема реактора.



1 — замедлитель (графит); 2 — блоки из урана; 3 — стержни поглотителя, содержащие кадмий или бор.

Блоки из U^{238} , обогащенного изотопом U^{235} , помещают в графит, играющий роль замедлителя нейтронов. Нейтроны, испускаемые при спонтанном делении ядер урана (это нейтроны высокой энергии) частично поглощаются ядрами U^{238} с последующим превращением его в плутоний Pu^{239} , а частично попадает в замедлитель, и их энергия в результате столкновения с ядрами замедлителя понижается. Низкоэнергетические (тепловые) нейтроны плохо захватываются ядрами U^{238} и хорошо захватываются U^{235} . Поэтому при определенных условиях коэффициент размножения нейтронов может оказаться больше 1, т.е. наступит цепная реакция. Если число нейтронов быстро нарастает, то реакцию можно замедлить, вводя в активную зону реакции стержни из кадмия и бора, которые интенсивно поглощают нейтроны и служат для регулировки процесса в реакторе. Управление реакцией облегчается тем, что часть нейтронов, испускаемых при делении U^{235} , испускается с задержкой до 1 мин.

Применение ядерной энергии для мирных целей было впервые осуществлено в СССР. Работами по выделению и использованию ядерной энергии руководил замечательный ученый И. В. Курчатов. В 1954 г. в Советском Союзе была введена в эксплуатацию первая атомная электростанция мощностью 5000 квт. Схема атомной электростанции изображена на рис. 4.



Энергия, выделяемая в активной зоне реактора 1, снимается теплоносителем, циркулирующим в контуре 2. Циркуляция обеспечивается насосом 3. В качестве теплоносителя применяется вода или щелочные металлы с низкой температурой плавления, например натрия (Тплавл = 98°C). В теплообменнике 4 теплоноситель отдает свое тепло воде, превращая ее в пар, вращающий турбину 5.

В настоящее время во многих странах ведутся работы по управляемому термоядерному синтезу. Наибольших успехов удалось добиться на ТОКОМАКах в Европе, в Японии, а также в области лазерного термоядерного синтеза.