

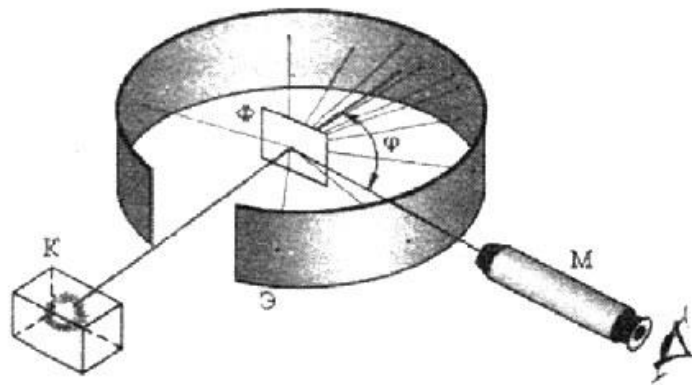
Часть 4. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Радиоактивность. Излучения. Распад

Раздел ОГЭ по физике: **4.1. Радиоактивность. Альфа-, бета-, гамма-излучения. Реакции альфа- и бета-распада.**

Радиоактивностью называют явление самопроизвольного излучения некоторых химических элементов, а вид этого излучения называют радиоактивным излучением. Первым радиоактивное излучение обнаружил **Анри Беккерель**, который, проводя эксперименты с солями урана, по почернению фотопластинки установил, что они самопроизвольно испускают невидимое излучение сильной проникающей способности. В дальнейшем было обнаружено, что не только уран, но и такие элементы, как радий и полоний, тоже испускают невидимое излучение.

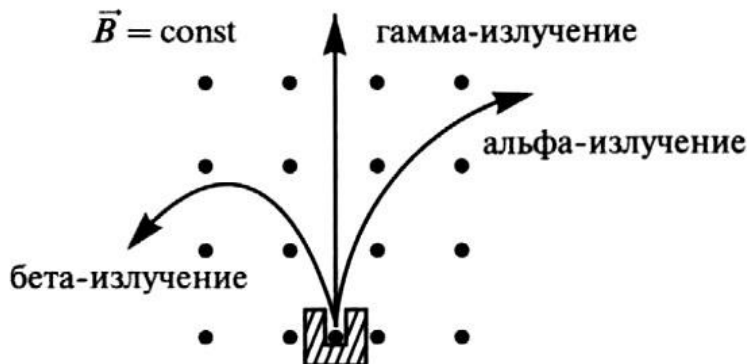
Радиоактивностью обладают вещества, существующие в природе, называют естественной радиоактивностью. Она проявляется у всех элементов таблицы Д.И. Менделеева, **порядковый номер которых больше 83**. В дальнейшем было установлено, что и некоторые искусственно полученные вещества радиоактивны.



Резерфорд, изучая радиоактивное излучение, обнаружил его сложный состав. Он поместил радиоактивный препарат в свинцовый сосуд с отверстием. Над сосудом расположил фотопластинку, на которую падало радиоактивное излучение, выходящее через отверстие и прошедшее через магнитное поле. Когда фотопластинку проявили, то на ней обнаружили три тёмных пятна. Одно пятно располагалось точно напротив отверстия. Это значит, что магнитное поле на него не действовало и заряженных частиц в этом излучении нет. Его назвали гамма-излучением (**γ -излучение**). Гамма-излучение представляет собой электромагнитное излучение или **поток фотонов**.

Наличие двух боковых пятен по разную сторону от центрального означает, что существуют два излучения, состоящие из частиц, имеющих заряды

противоположных знаков. Эксперимент показывает, что одно из них представляет собой поток положительно заряженных частиц. Их назвали **α -частицами**. Другое излучение состоит из отрицательно заряженных частиц. Их назвали **β -частицами**.



Изучение этих излучений позволило сделать вывод, что α -частицы — это ядра атома гелия. Их массовое число — 4, а зарядовое число (электрический заряд) +2, т.е. ${}^4_2\text{He}$

β -частицы представляют собой электроны. Их массовое число равно 0, а зарядовое число равно -1, т.е. ${}^0_{-1}e$

Радиоактивный распад

Радиоактивные элементы, испуская излучение, превращаются в другие элементы. При этом, поскольку излучение приводит к появлению нового химического элемента, можно сделать вывод, что изменения происходят именно с ядром атома. Радиоактивное превращение ядер одних элементов в ядра других элементов называют **радиоактивным распадом**. Существует **три вида радиоактивного распада**: альфа-, бета- и гамма-излучения.

Альфа-распад. Превращение атомных ядер, сопровождаемое испусканием альфа-частиц (ядер гелия ${}^4_2\text{He}$).

Если ${}^A_Z\text{X}$ – материнское ядро, то превращение этого ядра при альфа-распаде происходит по следующей схеме (правило

смещения): ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$, где ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ – символ дочернего ядра; ${}^4_2\text{He}$ – ядро атома гелия.

При альфа-распаде происходит смещение химического элемента **на две клетки влево** в таблице Менделеева.

Бета-распад. Радиоактивные ядра могут выбрасывать поток электронов, которые рождаются, согласно гипотезе Ферми, в результате превращения нейтронов в протоны. В соответствии с правилом смещения массовое число

ядра не изменяется: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}e + \gamma + \bar{\nu}$.

При бета-распаде химический элемент перемещается на одну клетку вправо в периодической системе Менделеева и, кроме электронов, испускается антинейтрино.

Гамма-излучение. Возникает при ядерных превращениях и представляет собой электромагнитное излучение. Имеет высокую энергию.

Э. Резерфорд установил, что воздух сильнее всего ионизируют альфа-лучи, в меньшей степени – бета-лучи и совсем плохо – гамма-лучи.

Поэтому **проникающая способность** оказалась самая малая у альфа-лучей (лист бумаги, несколько сантиметров слоя воздуха), а бета-лучи проходят сквозь алюминиевую пластину толщиной в несколько миллиметров. Очень велика проникающая способность у гамма-лучей (например, для алюминия – пластины толщиной в десятки сантиметров).

Период полураспада

В процессе радиоактивного распада число радиоактивных атомов уменьшается. Распад разных радиоактивных веществ происходит с разной интенсивностью. Например, радиоактивные изотопы йода распадаются значительно быстрее, чем изотопы стронция. Характеристикой интенсивности радиоактивного распада является величина, называемая периодом полураспада.

Периодом полураспада T называют промежуток времени, в течение которого распадается половина первоначального числа атомов радиоактивного вещества. Чем меньше период полураспада, тем быстрее распадутся все радиоактивные атомы.

Например, имеется $4 \cdot 10^8$ атомов радиоактивного изотопа йода, период полураспада которого 25 минут. Это означает, что в течение 25 минут распадается половина ядер изотопа йода, т.е. $2 \cdot 10^8$ ядер, а $2 \cdot 10^8$ ядер останется нераспавшимися. Еще через 25 минут нераспавшимися останется 10^8 ядер йода, еще через 25 минут — $0,5 \cdot 10^8$ ядер и так далее.

Особенностью закона радиоактивного распада является то, что невозможно предсказать, когда произойдет распад каждого конкретного атома. Оно может произойти во время одного периода полураспада, или двух, или трех. Период полураспада относится не к конкретному атому, а к совокупности атомов радиоактивного вещества.

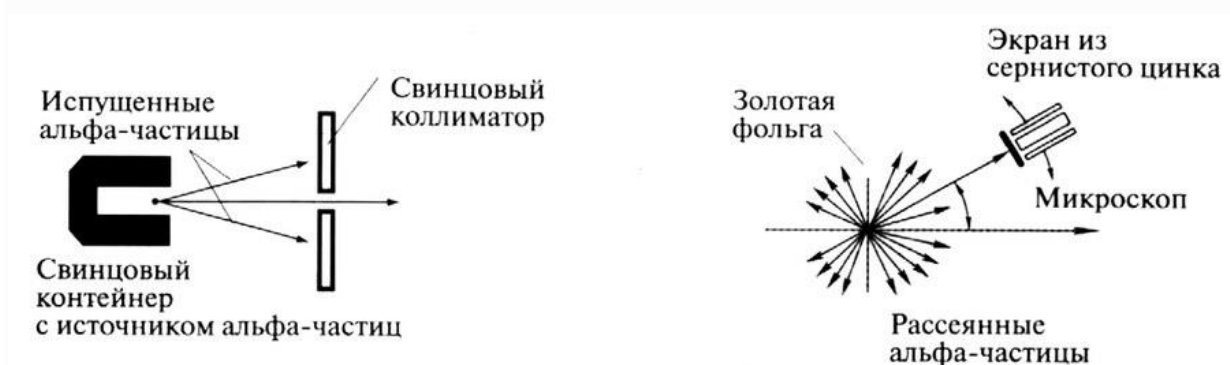
Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома

Раздел ОГЭ по физике: 4.2. Опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Планетарная модель атома.

Первую модель строения атома предложил **Джозеф Джон Томсон**, после того как он открыл **электрон** — частицу с наименьшим электрическим зарядом. Он представлял атом в виде шара из положительно заряженного вещества, в который вкраплены электроны. При этом положительный заряд шара равен суммарному заряду электронов. Модель атома Томсона называют «пудингом с

изюмом». Используя эту модель, можно было объяснить электрическую проводимость веществ, явление электризации тел и др.

Проводя опыты по изучению строения вещества, Резерфорд показал несостоятельность модели Томсона. Резерфорд облучал тонкую металлическую фольгу α -частицами, имеющими большую энергию. В соответствии с моделью Томсона α -частицы должны были отражаться от атома. Однако очень небольшое число частиц рассеивалось на углы от 90° до 180° . Большинство частиц проходило через фольгу, отклоняясь от направления движения на незначительные углы.



В результате экспериментов Резерфорд предложил новую модель строения атома, названную **планетарной моделью**. Он сделал следующие выводы:

- в атоме существует положительно заряженная частица, названная ядром атома, которая отталкивает α -частицы;
- размеры ядра малы по сравнению с размерами атома, поскольку отталкивается очень небольшое число α -частиц, а большинство α -частиц свободно проходит через фольгу; ядро имеет диаметр порядка $10^{-14} — 10^{-15}$ м.
- масса ядра сравнима с массой β -частицы, поскольку масса электронов в 8000 раз меньше массы α -частицы и электроны не смогли бы изменить направление её движения.

Таким образом, в соответствии с моделью атома Резерфорда **в центре атома расположено положительное ядро, вокруг которого движутся отрицательно заряженные электроны**. Поскольку масса электронов мала, то масса атома в основном сосредоточена в ядре.

Так как атом в целом нейтрален, то положительный заряд ядра должен быть равен суммарному заряду электронов. Число электронов в нейтральном атоме равно порядковому номеру Z элемента в периодической системе Д.И.

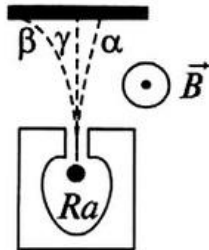
Менделеева. Заряд атомного ядра q_R равен произведению Z и заряда электрона e : $q_R = Z \cdot e$.

СТРОЕНИЕ АТОМА

Явление радиоактивности

самопроизвольное излучение веществом α -, β - и γ -частиц

фотопластинка



Открытие — А. Беккерель (1896 г.)

Опыт Э. Резерфорда (1899 г.):

α -частица — ионизированный атом He

β -частица — электрон

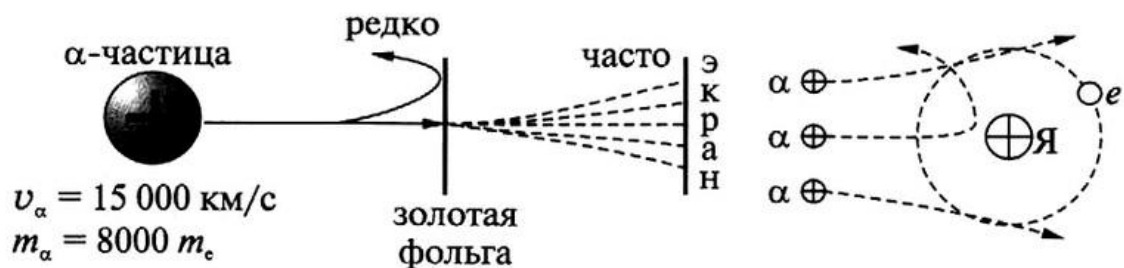
γ -частица — э/м волны

Опыт Резерфорда

Модель строения атома

Дж. Дж. Томсон (1903 г.) — “пирог с изюмом”

Опыт Резерфорда по рассеиванию α -частиц:



$$v_{\alpha} = 15\,000 \text{ км/с}$$
$$m_{\alpha} = 8000 m_e$$

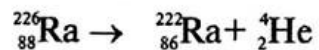
Выводы Резерфорда (модель атома):

Атом = Ядро + Электроны

$$d_{\text{я}} \sim 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}; m_{\text{я}} \approx m_{\text{а}}; q_{\text{я}} = Ze$$

Радиоактивные превращения атомных ядер

1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди



Состав атомного ядра. Изотопы

Раздел ОГЭ по физике: 4.3. Состав атомного ядра. Изотопы.

Экспериментальное изучение строения атомного ядра осуществлял Резерфорд. Он облучал β -частицами атомы азота и других элементов.

Ядро атома состоит из положительно заряженных **протонов** и не имеющих заряда **нейтронов**. Протоны и нейтроны называются **нуклонами**. Число нуклонов в ядре называется **массовым числом**.

Заряд ядра кратен элементарному электрическому заряду $Q = Ze$.

Число Z называется **зарядовым числом**, оно совпадает с номером элемента в периодической системе элементов Менделеева. Число нейтронов N равно разности массового и зарядового чисел: $N = A - Z$.

То, что ядра химических элементов устойчивы, нельзя объяснить гравитационным взаимодействием нуклонов:

- оно слишком мало, поскольку мала масса нуклонов;
- электромагнитное взаимодействие между этими частицами отсутствует, так как нейтрон не имеет электрического заряда.

Соответственно, между нуклонами в ядре действуют силы другой природы. Их называют **ядерными силами**, они характеризуют взаимодействие, называемое сильным. Ядерное взаимодействие очень сильное, но существует на малых расстояниях.

Ядро химического элемента обозначается как ${}_Z^AX$, где X – символ химического элемента. Например,

${}_1^1\text{H} = {}_1^1\text{p}$ — протон; ${}_0^1\text{n}$ — нейтрон; ${}_{-1}^0\text{e}$ — электрон; ${}_2^4\text{He}$ — альфа

Например: в ядре атома лития ${}_3^7\text{Li}$ содержится: протонов $Z = 3$ и нейтронов $N = A - Z = 4$.

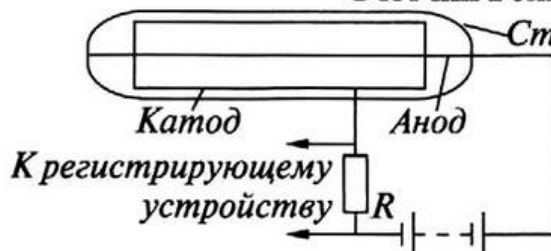
Ядра одного и того же химического элемента могут содержать разное число нейтронов. При этом они имеют одинаковое зарядовое число, но разное

массовое число. Например, ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$ имеют по 143 и 146 нейтронов соответственно. Ядра с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов являются ядрами одного и того же химического элемента и называются **изотопами**.

Изотопы имеют одинаковые химические свойства, что обусловлено одинаковым электрическим зарядом ядра, но разные физические свойства.

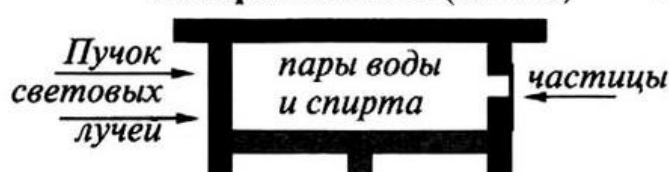
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ

Счетчик Гейгера (1908 г.)



Принцип действия:
ударная ионизация
Регистрирует:
электроны и γ -кванты

Камера Вильсона (1912 г.)



Ионы — центры → вдоль пути частицы → след (трек)

Пузырьковая камера (1952 г.)
(перегретая жидкость)

СТРОЕНИЕ ЯДРА

Открытие протона

Резерфорд (1919 г.): ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ ${}^1_1\text{H} = {}^1_1p$ — протон
 $m_p = 1,0072765$ а. е. м.

Открытие нейтрона

Дж. Чэдвик (1932 г.): ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0n$ 1_0n — нейтроны
 $m_n = 1,0086649$ а. е. м.

Состав атомного ядра

Д. Иваненко
В. Гейзенберг (1932 г.) $\rightarrow$ Ядро = Нуклоны = Протоны + Нейтроны



Протоны $\longleftrightarrow$ Ядерные силы $\longleftrightarrow$ Нейтроны
короткодействующие
(в 100 раз $> F$ электр.)

Изотопы

разновидности данного хим. элемента, различающиеся по массе атомных ядер

${}^1_1\text{H}$ — протий
(1 — p, 0 — n)

${}^2_1\text{H}$ — дейтерий
(1 — p, 1 — n)

${}^3_1\text{H}$ — тритий
(1 — p, 2 — n)

Ядерные реакции. Ядерный реактор

Раздел ОГЭ по физике: 4.4. Ядерные реакции. Ядерный реактор. Термоядерный синтез

Преобразование ядер одного элемента в ядра другого элемента происходит не только в процессе **радиоактивного распада**. Такое превращение может происходить при взаимодействии ядер элементов друг с другом или с такими частицами, как альфа-частицы, электроны, протоны, нейтроны. Преобразование исходного атомного ядра при взаимодействии с какой-либо частицей в другое ядро, отличное от исходного, называют **ядерной реакцией**.

Силы притяжения, связывающие протоны и нейтроны в ядре, называются **ядерными силами**. Свойства ядерных сил:

1. **зарядовая независимость** – ядерное (сильное) взаимодействие между двумя протонами, двумя нейтронами или между протоном и нейтроном одинаково;
2. **короткодействующий характер** – ядерные силы быстро убывают с расстоянием; радиус их действия порядка 10^{-15} м;
3. **насыщаемость** – ядерные силы могут удерживать друг возле друга в ядре ограниченное количество нуклонов; с ростом числа нуклонов ядра становятся менее стабильными.

Энергия, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется **энергией связи**.

Измерения показали, что масса покоя ядра M всегда меньше суммы масс покоя нуклонов (протонов и нейтронов), входящих в состав, на величину Δm , называемую **дефектом массы**: $\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M$.

Энергия связи атомного ядра $E_{св}$ равна произведению дефекта масс на квадрат скорости света: $E_{св} = \Delta mc^2$.

Массу ядер удобно выражать в атомных единицах массы: $1 \text{ а.е.м.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействиями с различными частицами или друг с другом. При записи ядерных реакций используются законы сохранения заряда и массового числа (числа нуклонов).

Например, осуществлена ядерная

реакция ${}_{12}^{25}\text{Mg} + {}_1^1\text{p} \rightarrow {}_{11}^{22}\text{Na} + ?$, в результате которой получен изотоп натрия и некоторая частица, которую нужно определить. Находим сумму массовых чисел в левой части уравнения. Она равна 26. Вычитаем из этого числа массовое число изотопа натрия: $26 - 22 = 4$. Следовательно, массовое число неизвестной частицы равно 4. Определяем зарядовое число: сумма зарядовых чисел в левой части равенства равна 13, следовательно, зарядовое число неизвестной частицы $13 - 11 = 2$. Таким образом, массовое число

образовавшейся в результате реакции частицы 4, а зарядовое число 2. Это —
 альфа-частица. Уравнение имеет вид: ${}_{12}^{25}\text{Mg} + {}_1^1p \rightarrow {}_{11}^{22}\text{Na} + {}_2^4\text{He}$

ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

устройство для осуществления управляемой ядерной реакции.

1942 г. — первый ядерный реактор (США — Э. Ферми)

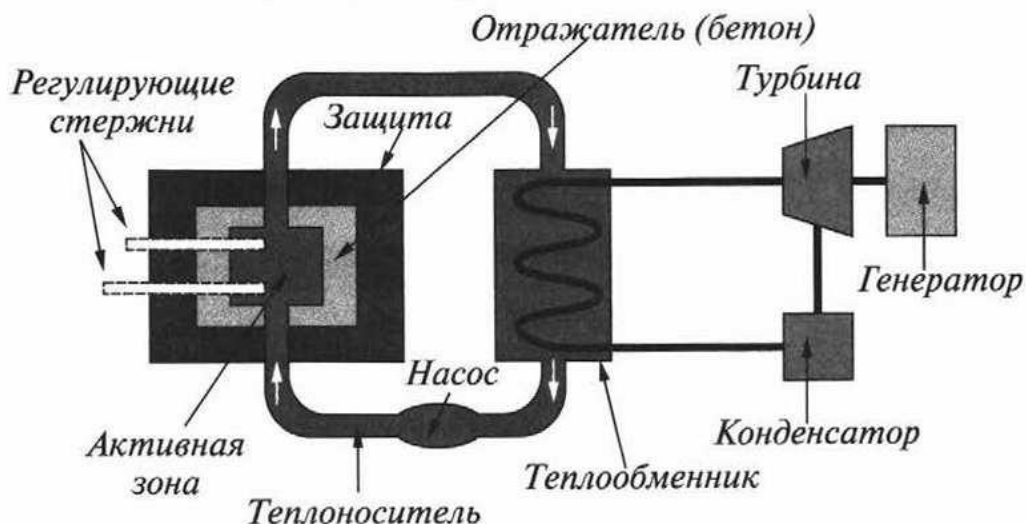
1946 г. — первый европейский реактор (СССР — И.В. Курчатов)

1954 г. — СССР (г. Обнинск) первая в мире АЭС (5 МВт)

Управление — регулирование скорости размножения свободных нейтронов в уране ($k = 1$).

Ядерное горючее — U-235 (природный U обогащают)

Ядерный реактор на медленных нейтронах



$E_{\text{внутр}}$ (ядер U) $\rightarrow E_k$ (n и осколков ядер) $\rightarrow E_{\text{внутр}}$ (H_2O) $\rightarrow$
 $\rightarrow E_{\text{внутр}}$ (пара) $\rightarrow E_k$ (пара) $\rightarrow E_k$ (ротора турбины и генератора) $\rightarrow$
 $\rightarrow$ электрическая энергия

Биологическое действие радиации

Поглощенная доза излучения (D) — энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым веществом и рассчитанная на единицу массы.

$$D = \frac{E}{m} \quad \text{СИ: } [D] = 1 \text{ Гр (Грэй)} \\ 100 \text{ Гр} = 1 \text{ Р (рентген)}$$

Коэффициент качества (K) — во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ -излучения (при одинаковых D).

Эквивалентная доза $H = D \cdot K$ СИ: $[H] = 1 \text{ Зв (Зиверт)}$

Термоядерный синтез

Термоядерный синтез — это разновидность ядерной реакции. В ходе ядерной реакции ядро атома взаимодействует либо с элементарной частицей, либо с ядром другого атома, за счет чего состав и строение ядра изменяются.

Тяжелое атомное ядро может распасться на два-три более легких — это реакция деления. Существует также реакция синтеза: это когда два легких атомных ядра сливаются в одно тяжелое.

В отличие от ядерного деления, которое может проходить как самопроизвольно, так и вынужденно, ядерный синтез невозможен без подвода внешней энергии.

Как известно, притягиваются противоположности, но вот атомные ядра заряжены положительно — поэтому они отталкиваются друг от друга. Эта ситуация называется **кулоновским барьером**. Чтобы преодолеть отталкивание, необходимо разогнать эти частицы до сумасшедших скоростей. Это можно осуществить при очень высокой температуре — порядка нескольких миллионов кельвинов. Именно такие реакции и называются термоядерными.

Естественным термоядерным реактором является звезда. В ней плазма удерживается под действием гравитации, а излучение поглощается — таким образом, ядро не остывает. На Земле же термоядерные реакции можно провести лишь в специальных установках (импульсные системы, квазистационарные системы, токамак, торсатрон).

В ходе ядерных и термоядерных реакций выделяется огромное количество энергии, которую можно использовать в различных целях — можно создать мощнейшее оружие, а можно преобразовать ядерную энергию в электричество и снабдить им весь мир. Энергия распада ядра давно используется на атомных электростанциях. Но термоядерная энергетика выглядит перспективнее. При термоядерной реакции на каждый нуклон (так называются составляющие ядра, протоны и нейтроны) выделяется намного больше энергии, чем при ядерной реакции. К примеру, при делении ядра урана на один нуклон приходится 0,9 МэВ (мегаэлектронвольт), а при синтезе ядра гелия из ядер водорода выделяется энергия, равная 6 МэВ.

В основных ядерных реакциях, которые планируется использовать в целях осуществления управляемого термоядерного синтеза, будут применяться **дейтерий** (тяжёлый водород, обозначается символами D и ^2H — стабильный изотоп водорода с атомной массой, равной 2) и **тритий** (сверхтяжёлый водород, обозначается символами T и ^3H — радиоактивный изотоп водорода), а в более отдалённой перспективе гелий-3 и бор-11.

Курчатовский институт работает над реактором IGNITOR.

Германия запустила термоядерный реактор-стелларатор Wendelstein 7-

X. Наиболее известен международный проект токамака ИТЭР

(ITER, Международный экспериментальный термоядерный реактор) в исследовательском центре Кадараш (Франция).