



Виртуальный курс физики

Атом и атомное ядро

Лекция 18. Строение атома и атомного ядра, радиоактивность, термоядерные реакции.

ТЕОРИЯ, ЗАДАЧИ, ПОДГОТОВКА К ЕГЭ

Уважаемые друзья!

Вы выбрали Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I и поступили, несомненно, правильно!

Наш университет основан в 1809 году. Это старейший инженерный транспортный вуз России. Это "особенный институт" - так в манифесте назвал его Император Александр I.

Для того, чтобы успешно пройти вступительные испытания и стать студентом одного из лучших технических вузов России, необходимо иметь высокую подготовку по физике.

Как правило, уровень подготовки выпускников школ не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к поступающим в высшие учебные заведения. Повысить этот уровень и качественно подготовиться к вступительным испытаниям по физике в технический университет помогут преподаватели факультета довузовской подготовки.

Факультет довузовской подготовки организует и проводит курсы по подготовке к поступлению в вуз по программам, соответствующим требованиям ЕГЭ.

Занятия проводятся по очной и заочной формам обучения. Занятия по очной форме обучения проводятся в дневное время - с 16.25 (тел. [457-84-04](tel:457-84-04)), и в вечернее время - с 18.00 (тел. [457-87-83](tel:457-87-83)). Мы с удовольствием ответим на все Ваши вопросы.

Факультет довузовской подготовки

***Курс дистанционного обучения по физике
изложен в авторской редакции доцента
Петербургского государственного университе-
та путей сообщения Императора Александра I
Кытина Юрия Александровича***

АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

Лекция 18.

Тема: Строение атома. Опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц. Ядерная модель атома. Атомное ядро. Строение атомных ядер. Протоны и нейтроны. Изотопы. Энергия связи атомных ядер. Дефект массы. Радиоактивность. α -, β - и γ -излучения. Термоядерные реакции.

18.1. Опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц. Ядерная модель атома

Модель атома была сформирована по результатам, полученным в опытах по рассеянию α -частиц Э. Резерфордом (рис.18.1). В этих опытах Э. Резерфорд изучал прохождение α -частиц через тонкие металлические фольги из золота и платины.

Альфа-частица представляет собой положительно заряженную частицу, заряд которой равен двум зарядам электрона, с массой, равной примерно $6,7 \cdot 10^{-27}$ кг. Источником α -частиц служили ядра урана 1, находящегося в свинцовом контейнере 2. Энергия испускаемых ими α -частиц составляла 4,05 МэВ ($6,48 \cdot 10^{-13}$ Дж), а их скорость – около $1,4 \cdot 10^7$ м/с. В опытах такие частицы в виде узкого пучка направлялись на тонкую фольгу 3 перпендикулярно ее поверхности. Альфа-частицы, прошедшие через фольгу, рассеивались ею и регистрировались на экране 4, покрытом веществом, способным светиться при попадании на него частицы. Для того чтобы исключить влияние молекул воздуха на процессы рассеяния α -частиц, в пространстве между экраном и фольгой обеспечивался высокий вакуум.

Результаты опыта показали, что большинство α -частиц, прошедших через фольгу, сохраняло прежнее направление, почти не отклоняясь от него. Но некоторые α -частицы отклонялись на углы, достигавшие 135 – 150° .

На основе результатов этих опытов Э. Резерфорд предложил модель атома как структуру, в которой весь положительный заряд атома считается сосредоточенным в центральной его части, называемой *ядром*, с размерами около 10^{-15} – 10^{-14} м. Вокруг ядра в области пространства с линейными размерами около 10^{-10} м располагаются отрицательно заряженные электроны.

Суммарный заряд электронов по модулю совпадает с зарядом ядра, так что в целом атом нейтрален.

В рамках такой модели результаты опытов Резерфорда объясняются следующим образом: угол рассеяния α -частицы зависит от расстояния, на котором эта частица находится от ядра во время ее движения. Так как

масса α -частицы почти в 2000 раз больше массы электрона, при прохождении через электронное облако α -частицы почти не рассеиваются.

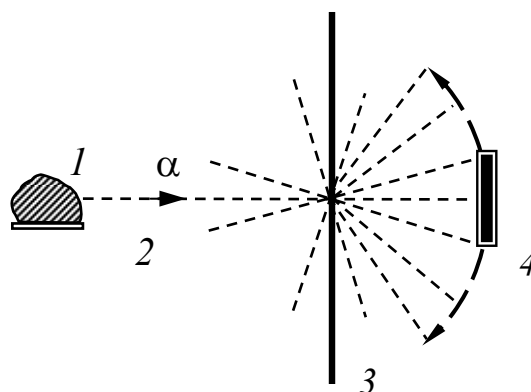


Рис.18.1

При малых расстояниях от ядра пролетающая α -частица, имеющая положительный заряд, испытывает большую силу отталкивания от него и рассеивается на большой угол.

Э. Резерфордом была теоретически выведена формула, связывающая число α -частиц, рассеивающихся на некоторый угол, с энергией таких частиц и зарядом ядра. Результаты опытов полностью подтвердили ее справедливость и послужили важным доказательством соответствия ядерной модели атома и его строения.

Однако ряд экспериментальных фактов не согласовывался с предложенной моделью. В соответствии с моделью электроны должны двигаться вокруг ядра, в противном случае в результате электростатического притяжения они бы упали на него. По законам электромагнетизма электрон при таком движении должен непрерывно излучать энергию и, следовательно, двигаться по спирали, приближаясь к ядру. Спектр такого излучения должен быть непрерывным. Результаты экспериментов свидетельствуют об обратном: атомы являются устойчивыми, а спектр излучения отдельных атомов – линейчатый. Объяснение этих противоречий было найдено Н. Бором и нашло отражение в предложенной им гипотезе о квантовом характере излучений.

18.2. Постулаты Бора. Испускание и поглощение света атомами

Противоречия, которые возникают при использовании ядерной модели атома Резерфорда, решаются в рамках теории, предложенной Н. Бором. Эта теория учитывает закономерности, которые наблюдаются в линейчатом

спектре водорода, и квантовый характер излучения и поглощения света. Она базируется на постулатах, которые называются *постулатами Бора*.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: в атоме существуют стационарные квантовые состояния, при которых атом не излучает и не поглощает энергии без внешних воздействий.

Каждому такому состоянию соответствует определенная энергия W_i . В этих состояниях электроны движутся по строго определенным *стационарным орбитам*, не излучая и не поглощая энергии.

Согласно *второму постулату Бора (правило частот)* при переходе из одного стационарного состояния в другое атом испускает или поглощает энергию в виде γ -кванта (*фотона*) с энергией, равной разности энергий атома в этих состояниях:

$$h\nu_{mn} = W_m - W_n,$$

где ν_{mn} – частота фотона, испущенного (или поглощенного) при переходе атома из состояния с энергией W_m в состояние с энергией W_n ; h – постоянная Планка.

Если $W_m > W_n$, происходит испускание фотона, при $W_m < W_n$ происходит поглощение фотона.

Основанное на квантовом характере излучения правило частот согласуется с экспериментально определенными спектрами излучения и поглощения, что подтверждает справедливость постулатов Бора.

18.3. Атомное ядро. Строение атомных ядер. Протоны и нейтроны. Изотопы

Атомное ядро состоит из положительно заряженных *протонов* и нейтральных частиц – *нейтронов* (часто они имеют одно название – *нуклоны*).

Протон является носителем элементарного положительного заряда ($q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Число протонов Z , содержащихся в атомном ядре, совпадает с атомным номером данного химического элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева, определяет заряд ядра ($q_{\text{я}} = Zq_p$, где q_p – заряд протона) и называется *зарядовым числом*.

Сумма числа протонов Z и числа нейтронов N , содержащихся в данном ядре, называется *массовым числом* A ядра:

$$A = Z + N.$$

Для обозначения атомных ядер используется символическая запись: ядро химического элемента X с зарядовым числом Z и массовым числом A обозначается таким образом: ${}^A_Z X$. Например, ядро водорода ${}^1_1\text{H}$, гелия – ${}^4_2\text{He}$, алюминия – ${}^{27}_{13}\text{Al}$, и т. д.

Ядра, содержащие одинаковое число протонов Z и разное число нейтронов N , называются *изотопами*. Так, например, водород имеет три изотопа: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ (дейтерий), ${}^3_1\text{H}$ (тритий).

Масса атомного ядра практически равна массе атома, так как масса электронов ничтожно мала по сравнению с массой входящих в ядро протонов и нейтронов (m_e составляет 1/1836 часть от массы протона: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг).

Химически чистые элементы представляют собой смесь изотопов, отличающихся друг от друга атомными массами. Поэтому каждый химический элемент имеет атомную массу, представляющую собой среднее значение атомных масс изотопов, содержащихся в данном химическом элементе.

18.4. Энергия связи атомных ядер. Дефект массы

Протоны и нейтроны удерживаются в атомном ядре ядерными силами, которые являются следствием сильных взаимодействий, относящихся наряду с гравитационными и электромагнитными к фундаментальным. Эти силы являются силами притяжения и относятся к короткодействующим: они проявляются на малых расстояниях между протонами и нейтронами, сравнимыми с размерами этих частиц. Данное расстояние называется *радиусом действия ядерных сил* и составляет около 10^{-15} м.

Для того чтобы удалить протон или нейтрон из атомного ядра, необходимо совершить работу против ядерных сил. Работа, которую следует совершить для удаления протона или нейтрона из ядра без сообщения ему кинетической энергии, называется *энергией связи протона или нейтрона*.

Энергией связи атомного ядра $W_{\text{св}}$ называется величина, равная по модулю работе, которую необходимо совершить, чтобы расщепить ядро на протоны и нейтроны без сообщения им кинетической энергии.

Энергетической характеристикой атомного ядра служит *удельная энергия связи* $w_{\text{св}}$ – величина, равная энергии связи атомного ядра, приходящейся на один нуклон:

$$w_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A},$$

где A – массовое число, равное числу нуклонов, содержащихся в ядре.

Удельная энергия связи $w_{\text{св}}$ зависит от массового числа A . Приведенная на рис. 18.2 эта зависимость позволяет сделать следующие выводы:

- а) наибольшие значения $w_{\text{св}}$ имеют ядра атомов, расположенных в интервале от ${}_{14}^{28}\text{Si}$ до ${}_{56}^{138}\text{Ba}$, т. е. при $28 < A < 138$: среднее значение $w_{\text{св}}$ в этом диапазоне составляет примерно 8,7 МэВ/нуклон;

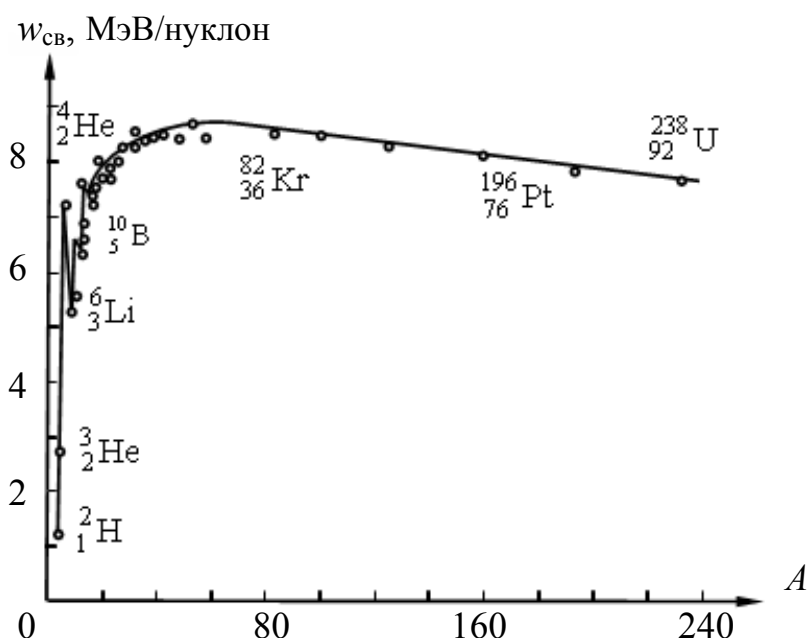


Рис. 18.2

- б) с ростом массового числа ($A > 138$) $w_{\text{св}}$ убывает и для ядер, находящихся в конце Периодической системы химических элементов, и, например, для урана составляет 7,6 МэВ/нуклон;
- в) в области малых массовых чисел наблюдаются максимумы и минимумы $w_{\text{св}}$: максимумы соответствуют ядрам с четным числом протонов и четным числом нейтронов (так называемые четно-четные ядра) – ${}_{2}^{4}\text{He}$, ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{8}^{16}\text{O}$, минимумы соответствуют ядрам с нечетным числом протонов и нейтронов – ${}_{1}^{2}\text{H}$, ${}_{3}^{6}\text{Li}$, ${}_{5}^{10}\text{B}$.

Мерой энергии связи ядра является *дефект массы* Δm – величина, равная разности между суммарной массой нуклонов, входящих в ядро, и массой ядра $M_{\text{я}}$:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}},$$

где Z – число протонов ядра; m_p – масса протона; N – число нейтронов; m_n – масса нейтрона.

В соответствии с выводами релятивистской динамики дефекту массы Δm соответствует энергия, которая и является энергией связи:

$$W_{\text{св}} = \Delta mc^2,$$

где c – скорость света,

$$W_{\text{св}} = [(Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}] c^2.$$

18.5. Радиоактивность. α -, β - и γ -излучения

Радиоактивностью называется превращение ядер одного химического элемента в ядра других химических элементов. Радиоактивность, протекающая самопроизвольно, называется *естественной радиоактивностью*. Такая радиоактивность наблюдается у большинства атомных ядер тяжелых элементов, порядковый номер которых в таблице химических элементов больше порядкового номера свинца ${}_{82}^{207}\text{Pb}$. Естественная радиоактивность сопровождается испусканием α -частиц, β -частиц, γ -излучений. Опытным путем по характеру движения этих частиц в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} установлены природа и характеристики этих частиц:

α -частицы представляют собой ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$;

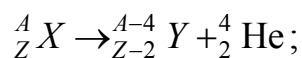
β -частицы являются быстрыми электронами с энергией, достигающей 10 МэВ;

γ -излучение представляет собой поток высокоэнергетического (жесткого) электромагнитного излучения с частотой, превышающей 10^{11} Гц, и высокой проникающей способностью.

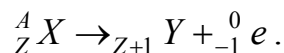
Процесс, при котором происходит испускание радиоактивных α - и β -излучений принято называть *радиоактивным распадом*. Ядро, которое испускает излучение, называется *материнским*, а вновь образующееся ядро – *дочерним*.

При радиоактивном распаде образование новых ядер подчиняется правилу смещения, которое является следствием законов сохранения зарядового Z и массового A чисел:

а) при α -распаде



б) при β -распаде



В этих соотношениях X – материнское ядро химического элемента, Y – дочернее ядро, ${}^4_2 \text{He}$ – ядро атома гелия (α -частица), ${}^0_{-1} e$ – электрон (β -частица).

Таким образом, α -распад уменьшает массовое число материнского ядра на 4, а зарядовое – на 2, β -распад увеличивает заряд материнского ядра на единицу, оставляя неизменным массовое число, так как массовое число электрона равно нулю.

Вновь образующиеся дочерние ядра, как правило, также являются радиоактивными и последовательно претерпевают ряд радиоактивных превращений, заканчивающихся на устойчивых ядрах свинца.

Количественно процессы радиоактивного распада описываются *основным законом радиоактивного распада*: число материнских ядер ΔN , распадающихся за промежуток времени от t до $t + \Delta t$, прямо пропорционально числу ядер в момент времени t и длительности интервала времени Δt :

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t.$$

Знак « \rightarrow » в этом выражении показывает, что число исходных материнских ядер убывает.

Коэффициент пропорциональности λ называется *постоянной распада* для данного вида материнских ядер и представляет собой относительное уменьшение числа ядер за единичный промежуток времени, т. е. эта величина определяет скорость распада:

$$\lambda = -\frac{\Delta N}{N \Delta t}.$$

Величина $\tau = 1/\lambda$ называется *средним временем жизни радиоактивного ядра*. Характеристики распада λ и τ определяются только свойствами ядра и не зависят от внешних условий.

С помощью основного закона радиоактивного распада можно получить закон убывания числа радиоактивных ядер с течением времени:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N – число ядер, оставшихся к моменту времени t ; N_0 – число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за $t_0 = 0$.

Промежуток времени T , в течение которого распадается половина первоначального числа ядер, называется *периодом полураспада*:

$$T \approx \frac{0,693}{\lambda} = 0,693\tau, \text{ или } \tau = \frac{1}{\lambda} \approx 1,44T.$$

Периоды полураспада радиоактивных ядер изменяются в широких пределах – от $1,4 \cdot 10^{-4}$ с у полония ${}_{84}^{209}\text{Po}$ до 4,5 млрд лет у урана ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Активностью радиоактивного вещества называется число ядер, распавшихся за единичный промежуток времени:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N.$$

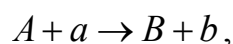
Так как $N = N_0 e^{-\lambda t}$, имеем

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}.$$

Единицей активности служит беккерель (Бк). Беккерель – активность вещества, при которой в единицу времени совершается один распад: $1 \text{ Бк} = 1/\text{с}$.

18.6. Ядерные реакции. Деление ядер урана. Ядерный реактор

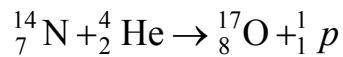
Ядерными реакциями называются взаимодействия атомных ядер между собой или с различными частицами, приводящие к превращению участвующих в реакции ядер. Ядерные реакции записываются таким образом:



где A и B – исходное и конечное ядра; a – частица, взаимодействующая с ядром A ; b – частица, являющаяся результатом ядерной реакции.

Энергией Q ядерной реакции называется разность кинетических энергий конечных (B, b) и начальных (A, a) частиц. Реакции, которые протекают с выделением энергии, называют *экзотермическими*, а реакции, протекающие с поглощением энергии, – *эндотермическими*.

Во всех ядерных реакциях соблюдаются законы сохранения зарядового t и массового A чисел. Так, например, в реакции



сумма массовых чисел, участвующих в реакции азота и гелия, равна 18, сумма массовых чисел продуктов реакции кислорода и протона также равна 18. Суммы зарядовых чисел частиц, вступивших в реакцию, и продуктов реакции равны друг другу.

Особым видом ядерной реакции является *реакция деления* тяжелых ядер, при которой тяжелое ядро (например, урана) под воздействием попавшего в него нейтрона делится на две части, которые называются *осколками*.

Такая реакция сопровождается выделением большой энергии: например, энергия, выделяющаяся при делении одного ядра ${}^{238}_{92}\text{U}$, составляет 220 МэВ, или $3,87 \cdot 10^{-11}$ Дж. При делении же ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется энергия, равная $7,92 \cdot 10^{10}$ Дж. Энергия деления проявляется в виде кинетической энергии осколков деления, которые под действием электрических сил отталкивания приобретают огромную скорость.

Образующиеся осколки деления оказываются перегруженными нейтронами, которые являются избыточными и испускаются осколками. Испущенные нейтроны могут вызвать новые акты деления. Процесс такого развития реакции деления зависит от *среднего числа нейтронов* $n_{\text{ср}}$, приходящихся на один нуклон. Например, при делении ядер урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ среднее число нейтронов составляет $n_{\text{ср}} = 2,5$.

Механизм протекания реакции деления можно объяснить на основе *капельной модели атомного ядра*. При попадании в ядро нейтрона ядро-капля деформируется и принимает форму эллипсоида. При этом возрастает поверхностная энергия и уменьшается энергия электростатического взаимодействия протонов. Ядро оказывается в неустойчивом состоянии и совершает колебания, вытягиваясь и сжимаясь. Если энергия возбуждения ядра оказывается больше, чем необходимая для деления энергия (*порог деления*), ядро разделяется на два осколка.

Реакция деления, в ходе которой испускаемые осколками нейтроны вызывают новые акты деления, называется *цепной реакцией*. Необходимым условием протекания такой реакции является наличие нейтронов деления перед каждым новым делением. Для этого отношение числа нейтронов K , возникших в каком-либо звене реакции, к числу нейтронов, возникших в предыдущем звене, должно быть равно или больше единицы: $K \geq 1$. Число K называется *коэффициентом размножения*.

Кроме коэффициента размножения на развитие цепной реакции оказывают влияние размеры *активной зоны* – области пространства, в которой происходит деление. Минимальные размеры зоны, при которых $K \geq 1$, называются *критическими*, а минимальная масса делящегося вещества, находящегося в пределах критических размеров, называется *критической массой*.

Цепная ядерная реакция, в которой регулируется скорость ее протекания, называется *управляемой реакцией деления*. Такой тип реакции осуществляется в *ядерных реакторах*. Основными частями ядерного реактора являются (рис. 18.3) ядерное топливо (горючее), замедлитель и отражатель нейтронов, теплоноситель для отвода теплоты от реактора, регулирующие скорость реакции стержни, которые захватывают нейтроны деления и снижают коэффициент размножения.

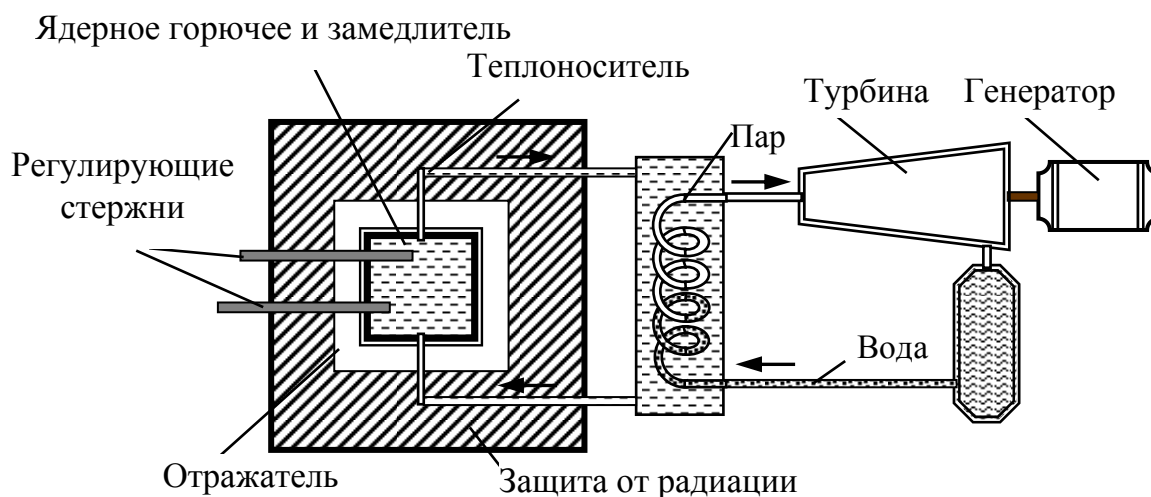


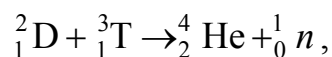
Рис. 18.3

Ядерным топливом в реакторе служат изотопы урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$, плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$. Замедлители и отражатели нейтронов служат для увеличения числа нейтронов с целью развития реакции. Теплоносителем обычно служат вода, жидкий натрий или другие вещества. Теплоноситель нагревает воду, и образовавшийся при этом пар поступает на турбину, которая связана с генератором электрического тока.

18.7. Термоядерные реакции

Термоядерные реакции представляют собой взаимодействия легких ядер, в результате которых образуются более тяжелые ядра. Этот процесс называется *синтезом ядер*. Характерной особенностью подобных реакций

является выделение большой энергии: энергия, выделяющаяся при такой реакции в расчете на один нуклон, в несколько раз превышает энергию, выделяющуюся при реакции деления. Так, например, при слиянии двух изотопов водорода (дейтерия ${}^2_1\text{H}({}^2_1\text{D})$ и трития ${}^3_1\text{H}({}^3_1\text{T})$) образуется ядро гелия ${}^4_2\text{He}$:



где 1_0n – нейтрон.

В это случае при расчете на один нуклон выделяется 3,5 МэВ энергии, а в реакции деления – всего 1 МэВ.

Для того чтобы реакция синтеза произошла, взаимодействующие легкие ядра должны иметь большую кинетическую энергию, необходимую для преодоления сил электростатического отталкивания положительно заряженных ядер. Например, чтобы добиться слияния двух ядер дейтерия, необходимо преодолеть потенциальный барьер с энергией 0,1 МэВ. Это возможно, если ядра будут находиться при температуре $T = 2 \cdot 10^9$ К. В этом случае кинетическая энергия их хаотического движения окажется достаточной для сближения и слияния ядер. Для практического осуществления термоядерной реакции оказывается достаточно температуры порядка 10^7 К. В естественных условиях такие температуры характерны для центральной части Солнца и других звезд, где и протекают термоядерные реакции, обеспечивающие их излучение.

Осуществление термоядерных реакций в земных условиях связано с трудностью получения высоких температур и управления такими реакциями. Впервые искусственная термоядерная реакция реализована в водородной бомбе. Взрывчатым веществом в бомбе является смесь дейтерия ${}^2_1\text{D}$ и трития ${}^3_1\text{T}$, а высокая температура для протекания реакции создается взрывом атомной бомбы, которая является частью водородной бомбы.

Одной из важнейших проблем современной энергетики является получение управляемой термоядерной реакции. Основной трудностью в получении такой реакции является удержание высокотемпературной плазмы в объеме устройства, называемого *термоядерным реактором*, в котором протекает указанная реакция. С этой целью применяются сильные магнитные поля, которые сжимают плазму. Решение данной и других не менее сложных задач практического использования термоядерной энергии позволит получить неограниченный источник энергии.

