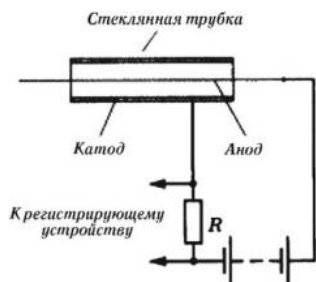


Методы регистрации заряженных частиц

Метод сцинтилляций (сцинтилляционные счетчики частиц). В основе метода – способность частиц вызывать вспышки на экране, покрытом слоем специального вещества. Этот метод дает возможность счета частиц и позволяет фиксировать их распределение по энергиям.

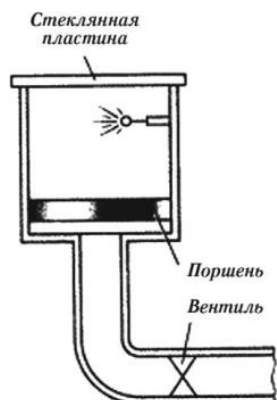
Газоразрядный счетчик Гейгера



Счетчик Гейгера применяется для регистрации электронов и γ -квантов.

Устройство: стеклянная трубка, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), тонкая металлическая нить, идущей вдоль оси трубки (анод), трубка заполняется аргоном. *Принцип действия* – ударная ионизация. Заряженная частица, влетая в счетчик, ионизирует молекулы газа, создавая положительные ионы и электроны. Электрическое поле ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация, они, взаимодействуя с молекулами газа, создают лавину ионов. Ток через счетчик резко возрастает. На нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство. Для регистрации новой частицы, лавинный разряд необходимо погасить. В момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, напряжение между анодом и катодом резко уменьшается, и разряд прекращается.

Камера Вильсона



Принцип действия – конденсация перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек жидкости. *Устройство:* герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению. При резком опускании поршня пар в камере адиабатно расширяется, охлаждается и становится перенасыщенным. Пар легко конденсируется, если в сосуде появляются центры конденсации. Центрами конденсации становятся ионы, которые образует в рабочем пространстве камеры пролетевшая частица. Видимый след из капелек жидкости, который оставляет заряженная частица, называется *трек*.

Затем камера возвращается в исходное состояние, и ионы удаляются электрическим полем. Если поместить камеру Вильсона в однородное магнитное поле, то в результате действия силы Лоренца треки частиц искривляются. Это позволяет определить удельный заряд частицы (по радиусу кривизны трека и скорости частицы). Если удельный заряд частицы известен, то по радиусу кривизны трека можно определить энергию и скорость частицы.

Пузырьковая камера

В 1952 г. американский ученый Д. Глейзер предложил использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах (центрах парообразования), образующихся при движении быстрой заряженной частицы, появляются пузырьки пара, дающие видимый трек. Это устройство получило название «пузырьковая камера».

В исходном состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением при температуре выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара. В качестве жидкости используются жидкий водород и пропан.

Метод толстослойных фотоэмульсий основан на фотохимическом действии быстрых заряженных частиц, проходящих через фотоэмульсию. Толщина слоя фотоэмульсии составляет от 0,5 до 1 мм. Быстрая заряженная частица ионизирует атомы фотоэмульсии и оставляет скрытое изображение. После обработки это изображение становится видимым и может изучаться.

Радиоактивность

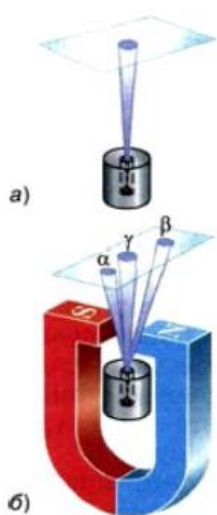
Радиоактивность – способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений.

Радиоактивность данного химического элемента не зависит от того, является ли химический элемент чистым или входит в состав какого-либо химического соединения. Радиоактивность не зависит от внешних условий: температуры, освещения, давления. Это означает, что радиоактивность представляет собой внутреннее свойство атомов радиоактивного элемента.

Радиоактивный распад – самопроизвольный распад атомов радиоактивного вещества, в результате которого ядра одних химических элементов превращаются в ядра других химических элементов.

Распадающееся ядро X называется материнским ядром, ядро продукта распада Y – дочерним ядром.

Опыты Э. Резерфорда. Альфа-распад. Бета-распад. Гамма-излучение



Опыты Э Резерфорда: Пучок радиоактивного излучения радия выходит сквозь узкое отверстие и попадает на фотопластинку (излучение радия происходит во все стороны, но сквозь толстый слой свинца оно пройти не может). После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно тёмное пятно — как раз в том месте, куда попадал пучок. Если пропустить радиоактивное излучение через сильное магнитное поле, то на проявленной пластинке возникает три пятна. Отклонение в разные стороны свидетельствует о разных знаках электрических зарядов частиц. В одном потоке присутствовали только положительно заряженные частицы, в другом — отрицательно заряженные. А центральный поток представлял собой излучение, не имеющее электрического заряда.

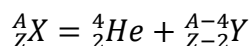
Положительный заряд был назван **α -излучение**, оно представляет собой ядра атомов гелия ${}^4_2\text{He}$. Отрицательный заряд был назван **β -излучение** представляет собой поток быстрых электронов, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Оставшаяся компонента была названа **γ -излучение**, оно представляет собой электромагнитное излучение.

Проникающая способность α -частиц в твердых телах обычно очень мала, β -частицы обладают большей проникающей способностью, чем α -частицы. А γ - имеют самую большую проникающую способность. Для защиты от γ -излучения необходимы защитные стены или оболочки толщиной несколько десятков сантиметров или даже метров.

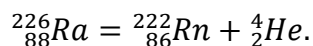
Превращения атомных ядер, которые сопровождаются испусканием α - и β -частиц, называются соответственно α - и β -распадом. Термина « γ -распад» не существует, так как α - и β -распад сопровождаются γ -излучением.

Правила смещения

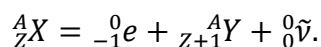
1. α -распад



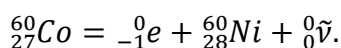
Если при радиоактивном превращении испускаются α -частицы, то в результате такого превращения образуется ядро элемента, находящегося в таблице Менделеева на две клетки раньше исходного ядра плюс ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$ (или α -частица), например



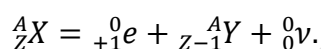
2. электронный β -распад



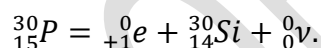
Если при радиоактивном превращении испускаются β^- -частицы, то в результате такого превращения образуется ядро элемента, находящегося в таблице Менделеева в следующей после исходного ядра клетке плюс электрон и антинейтрино (частица, не имеющая заряда и масса покоя которой равна нулю), например



3. позитронный β -распад



Если при радиоактивном превращении испускаются β^+ -частицы, то в результате такого превращения образуется ядро элемента, находящегося в таблице Менделеева в предшествующей исходному ядру клетке плюс позитрон и нейтрино (частица, не имеющая заряда и масса покоя которой равна нулю), например



γ -излучение сопровождает α - и β -распады, а также возникает при ядерных реакциях, торможении частиц, их распаде и т. д.

γ -излучение испускается дочерним ядром, которое в момент своего образования оказывается в возбужденном состоянии, а затем переходит в невозбужденное состояние.

Закон радиоактивного распада

Если имеется большое количество одинаковых радиоактивных ядер, то вероятность распада каждого из них в любой момент времени одинакова. Радиоактивный распад любого ядра является случайным процессом, поэтому момент его распада предсказать невозможно.

Период полураспада (T) – это время, в течение которого распадается половина способных к распаду ядер.

Зная период полураспада, можно рассчитать количество оставшихся и распавшихся ядер по прошествии промежутков времени, кратных периоду полураспада

Время	Осталось ядер	Распалось ядер
$t = T$	$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot 2^{-1}$	$\frac{N_0}{2} = N_0 - \frac{N_0}{2} = N_0 - N_0 \cdot 2^{-1} = N_0(1 - 2^{-1})$
$t = 2T$	$\frac{N_0}{4} = N_0 \cdot 2^{-2}$	$\frac{N_0}{2} + \frac{N_0}{4} = \frac{3N_0}{4} = N_0 - \frac{N_0}{4} = N_0 - N_0 \cdot 2^{-2} = N_0(1 - 2^{-2})$
$t = 3T$	$\frac{N_0}{8} = N_0 \cdot 2^{-3}$	$\frac{3N_0}{4} + \frac{N_0}{8} = \frac{7N_0}{8} = N_0 - \frac{N_0}{8} = N_0 - N_0 \cdot 2^{-3} = N_0(1 - 2^{-3})$
$t = 4T$	$\frac{N_0}{16} = N_0 \cdot 2^{-4}$	$\frac{7N_0}{8} + \frac{N_0}{16} = \frac{15N_0}{16} = N_0 - \frac{N_0}{16} = N_0 - N_0 \cdot 2^{-4} = N_0(1 - 2^{-4})$

Видно, что количество оставшихся и распавшихся ядер подчиняются закономерностям. **Закон радиоактивного распада:** число нераспавшихся атомных ядер при естественном радиоактивном распаде изменяется с течением времени по закону

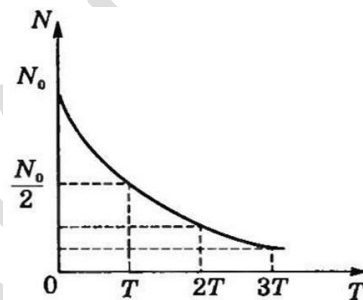
$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}},$$

где N_0 число ядер в начальный момент времени.

Важно! В некоторых задачах просят найти количество распавшихся ядер $\bar{N}$

$$\bar{N}(t) = N_0 \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}} \right).$$

График закона радиоактивного распада (график зависимости количества нераспавшихся ядер от времени). На рисунке период полураспада соответствует времени, в течение которого число радиоактивных ядер (активность) уменьшается вдвое.



Важно! График зависимости количества распавшихся ядер от времени будет возрастающим и начинаться из начала координат.

Нуклонная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра

Нуклоны — это частицы, входящие в состав атомного ядра. Атомное ядро любого химического элемента состоит из протонов и нейтронов.

Массовое число (A) — количество протонов и нейтронов (нуклонов) в ядре атома. Массовое число равно округленному до целого значению массы атомного ядра в а.е.м.

Массовое число равно сумме количества протонов и нейтронов в ядре

$$A = Z + N.$$

где N — количество нейтронов в ядре.

Зарядовое число (Z) — количество протонов в ядре. Зарядовое число равно сумме зарядов протонов, входящих в состав ядра, выраженной в элементарных электрических зарядах. Элементарный электрический заряд равен заряду электрона. Зарядовое число равно порядковому номеру химического элемента в периодической таблице Менделеева.

Элементарные частицы:

- протон:** обозначение 1_1p , заряд $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.
- нейтрон:** обозначение 1_0n , заряд отсутствует, масса $m_n = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.
- электрон:** обозначение ${}^0_{-1}e$, заряд $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Измерения массы атомов показали, что практически все химические элементы имеют изотопы. **Изотопы** — это атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое количество протонов, но отличающиеся количеством нейтронов в ядре.

Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы

Между нуклонами ядра действуют самые мощные силы природы — ядерные силы.

Ядерные силы — это силы притяжения, связывающие протоны и нейтроны в атомном ядре и обеспечивающие существование устойчивых ядер.

Свойства ядерных сил:

1. являются силами притяжения;
2. являются короткодействующими силами (действуют на малых расстояниях, не превышающих размеры ядра; на таком расстоянии ядерные силы больше кулоновских приблизительно в 100 раз)
3. обладают свойством зарядовой независимости (ядерные силы, действующие между двумя протонами, двумя нейтронами и между протоном и нейтроном, одинаковы);
4. имеют свойство насыщения (каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов, а не со всеми нуклонами ядра);
5. не являются центральными (не действуют по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов).

Опытным путем было установлено, что благодаря действию сил притяжения масса ядра всегда меньше суммы масс протонов и масс нейтронов, входящих в состав этого ядра. **Дефект масс** – это величина, равная разности суммы масс входящих в ядро нуклонов и массы ядра

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{ядра}}$$

Энергия связи – это энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, или энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных нуклонов

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2.$$

Если в формуле энергии связи массы протона и нейтрона выражены в килограммах, а скорость света – в метрах в секунду, то энергия связи будет измерена в джоулях. Однако в физике атома и атомного ядра энергию ядер и элементарных частиц чаще выражают в *мегаэлектронвольтах* (МэВ).

Энергетический эквивалент 1 а.е.м.

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \Rightarrow E = mc^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \approx 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж.}$$

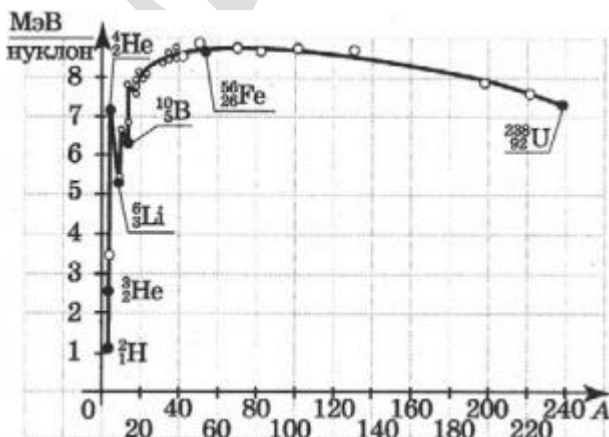
$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \Rightarrow E = \frac{1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}}{1,6 \cdot \frac{10^{-19} \text{ Дж}}{\text{эВ}}} = 931,5 \text{ МэВ.}$$

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot 931,5$$

В данном случае дефект масс выражается в а.е.м., а энергия в *мегаэлектронвольтах* (МэВ).

Для характеристики прочности ядра используется величина, которая называется удельной энергией связи. **Удельная энергия связи** – это энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон ядра

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$



Удельная энергия связи неодинакова для разных химических элементов и даже для изотопов одного и того же химического элемента. Удельная энергия связи нуклона в ядре меняется в среднем в пределах от 1 МэВ у легких ядер до 8,6 МэВ у ядер средней массы (с массовым числом $A \approx 100$). У тяжелых ядер ($A \approx 200$) удельная энергия связи нуклона меньше, чем у ядер средней массы, приблизительно на 1 МэВ, так что их превращение в ядра среднего веса (деление на 2 части) сопровождается

выделением энергии в количестве около 1 МэВ на нуклон, или около 200 МэВ на ядро. Превращение легких ядер в более тяжелые ядра дает еще больший энергетический выигрыш в расчете на нуклон.

Зависимость удельной энергии связи от массового числа установили экспериментально. Из рисунка хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона и ядра в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше этого значения. Кривая на рисунке имеет слабо выраженный максимум. Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет возрастающей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

Ядерные реакции. Деление и синтез ядер

Атомные ядра при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются увеличением или уменьшением кинетической энергии участвующих в них частиц.

Ядерные реакции – это изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

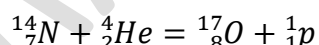
При ядерных реакциях выполняются следующие законы.

1. Закон сохранения электрического заряда: сумма электрических зарядов атомных ядер и частиц до реакции равна сумме электрических зарядов атомных ядер и частиц после реакции.

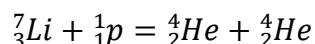
2. Закон сохранения массового числа: сумма нуклонов атомных ядер и частиц до реакции равна сумме нуклонов атомных ядер и частиц после реакции.

Примеры ядерных реакций

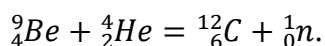
Первое наблюдавшееся превращение ядра (Ю. Резерфорд, 1919) – открытие протона:



Первая ядерная реакция на быстрых протонах (1932):



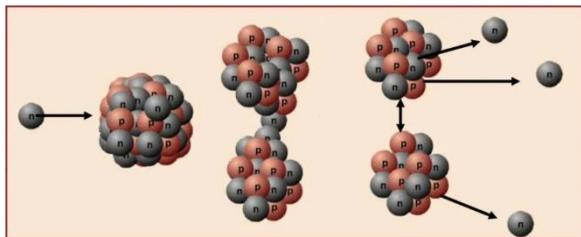
Открытие нейтрона (Дж. Чедвик, 1932) – бериллиевое излучение:



Деление ядер – это деление атомного ядра на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе. Делиться могут только ядра некоторых тяжелых элементов. При делении ядер испускаются нейтроны и γ -лучи, а также выделяется большая энергия.

Механизм деления ядер (капельная модель)

В тяжелых ядрах действуют значительные ядерные силы, которые удерживают ядро от распада. Под влиянием поглощенного нейтрона ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму. Оно растягивается до тех пор, пока силы отталкивания половинок ядра не начинают преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке. В результате ядро разрывается на два осколка X и Y .

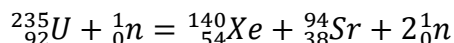


Под действием сил кулоновского отталкивания осколки разлетаются со скоростью, равной приблизительно $1/30$ скорости света. Одновременно испускается излучение высокой частоты.

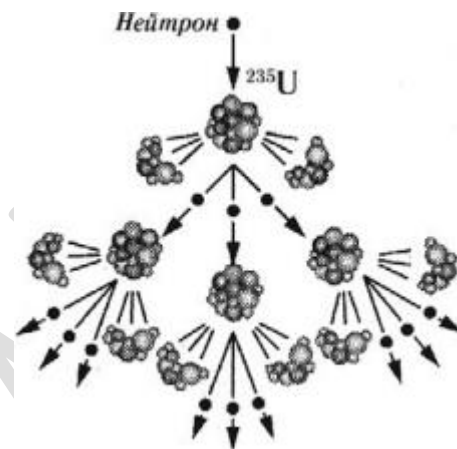
Цепная ядерная реакция – ядерная реакция деления

тяжелых ядер нейтронами, в результате которой число нейтронов возрастает и поэтому может возникнуть самоподдерживающийся процесс деления.

В 1939 году было обнаружено, что при попадании нейтрона в ядро изотопа урана-235 происходит деление ядра на два или три осколка с испусканием 2–3 нейтронов:



Эти нейтроны способны вызвать деление 2–3 новых ядер урана с испусканием 4–9 новых нейтронов и т. д., процесс может продолжаться самостоятельно, вовлекая все большее число новых ядер.



Условия протекания цепной ядерной реакции:

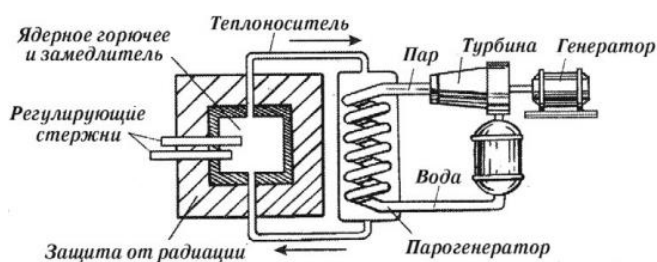
1. должны отсутствовать примеси, поглощающие нейтроны;
2. количество вещества, способного делиться, должно быть достаточным для того, чтобы образующиеся нейтроны могли соударяться с другими ядрами, не покидая объем, не испытывая взаимодействия;
3. скорость нейтронов должна быть достаточной, чтобы вызвать деление ядер.

Минимальное количество вещества, необходимое для осуществления цепной ядерной реакции, называется *критической массой*.

Устройства, в которых осуществляются управляемые цепные ядерные реакции, называются **ядерными реакторами**.

Основные элементы ядерного реактора:

1. Ядерное горючее (сырьевые и делящиеся вещества в реакторах – изотопы урана, плутоний, торий).
2. Замедлитель и отражатель нейтронов, которые способствуют увеличению числа медленных нейтронов, наиболее эффективных для развития цепной реакции деления (графит, тяжелая или обычная вода).
3. Регулирующие стержни, которые вводят в активную зону реактора для поддержания стационарного режима реактора, так как быстрое развитие реакции сопровождается выделением большого количества тепла и перегревом реактора; стержни выполнены из материалов, сильно поглощающих тепловые нейтроны (из бора, кадмия).
4. Теплоноситель, который необходим для отвода тепла, образующегося в реакторе (вода, жидкий натрий и др.).
5. Защитные устройства, которые применяют для защиты персонала, обслуживающего реактор, от действия на организм нейтронных потоков и γ -лучей.



Термоядерный синтез

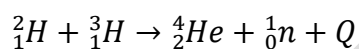
График зависимости удельной энергии связи нуклонов в ядре от массового числа показывает, что кроме реакции деления тяжелых ядер с выделением энергии идут реакции синтеза легких ядер.

Синтез ядер – это слияние ядер в одно ядро, сопровождающееся выделением энергии.

Для осуществления реакции синтеза легких ядер требуются высокие энергии сливающихся частиц, так как необходимо преодолеть кулоновское отталкивание. Этого можно достичь за счет высокой температуры вещества.

Термоядерная реакция – это реакция синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящая при сверхвысоких температурах (порядка 10^7 К и выше). В природе термоядерные реакции происходят в недрах звезд. При термоядерном синтезе энергетический выход на единицу массы топлива оказывается выше, чем при реакции деления тяжелых ядер урана.

Пример реакции синтеза:



Синтез гелия из тяжелых изотопов водорода – дейтерия и трития – происходит при температуре около $5 \cdot 10^7$ К.

При синтезе 1 г гелия из дейтерия и трития выделяется $4,2 \cdot 10^{11}$ Дж – такая же энергия выделяется при сгорании 10 т дизельного топлива.

Термоядерный синтез может стать одним из возможных альтернативных источников энергии. Поиск таких источников энергии важен, так как запасы нефти и газа на Земле ограничены.

В настоящее время ведется испытание установок для осуществления управляемых термоядерных реакций синтеза гелия из водорода. Запасы водорода на Земле практически неисчерпаемы. Количество дейтерия в океанической воде составляет примерно $4 \cdot 10^{11}$ т, чему соответствует энергетический запас 10^{17} МВт·год. Наиболее заманчивой является возможность извлечения энергии дейтерия, содержащегося в обычной воде.