

## Ядерные реакции

Темы кодификатора ЕГЭ: ядерные реакции, деление и синтез ядер.

В предыдущем листке мы неоднократно говорили о расщеплении атомного ядра на составные части. Но как этого добиться в действительности? В результате каких физических процессов можно разбить ядро?

Наблюдения радиоактивного распада в изменяющихся внешних условиях — а именно, при различных давлениях и температурах, в электрических и магнитных полях — показали, что скорость радиоактивного распада от этих условий не зависит. Никаких превращений химических элементов друг в друга все эти факторы вызвать не способны. Очевидно, изменения энергии тут слишком малы, чтобы повлиять на атомное ядро — так ветер, обдувающий кирпичный дом, не в состоянии его разрушить.

Но разрушить дом можно артиллерийским снарядом. И Резерфорд в 1919 году решил воспользоваться наиболее мощными «снарядами», которые имелись тогда в распоряжении. Это были  $\alpha$ -частицы, вылетающие с энергией около 5 МэВ при радиоактивном распаде урана. (Как вы помните, это те самые снаряды, которыми он восемь лет назад бомбардировал лист золотой фольги в своих знаменитых опытах, породивших планетарную модель атома.)

Правда, превращений золота в другие химические элементы в тех экспериментах не наблюдалось. Ядро золота  ${}_{79}^{197}\text{Au}$  само по себе весьма прочное, да и к тому же содержит довольно много протонов; они создают сильное кулоновское поле, отталкивающее  $\alpha$ -частицу и не подпускающее её слишком близко к ядру. А ведь для разбивания ядра  $\alpha$ -снаряд должен сблизиться с ядром настолько, чтобы включились ядерные силы! Что ж, раз большое количество протонов мешает — может, взять ядро полегче, где протонов мало?

Резерфорд подверг бомбардировке ядра азота  ${}_{7}^{14}\text{N}$  и в результате осуществил первую в истории физики *ядерную реакцию*:



В правой части (1) мы видим *продукты реакции* — изотоп кислорода и протон.

Стало ясно, что для изучения ядерных реакций нужно располагать частицами-снарядами высоких энергий. Такую возможность дают *ускорители* элементарных частиц. Ускорители имеют два серьёзных преимущества перед естественными «радиоактивными пушками».

1. В ускорителях можно разгонять любые заряженные частицы. В особенности это касается протонов, которые при естественном распаде ядер не появляются. Протоны хороши тем, что несут минимальный заряд, а значит — испытывают наименьшее кулоновское отталкивание со стороны ядер-мишеней.
2. Ускорители позволяют достичь энергий, на несколько порядков превышающие энергию  $\alpha$ -частиц при радиоактивном распаде. Например, в Большом адронном коллайдере протоны разгоняются до энергий в несколько ТэВ; это в миллион раз больше, чем 5 МэВ у  $\alpha$ -частиц в реакции (1), осуществлённой Резерфордом.

Так, с помощью протонов, прошедших через ускоритель, в 1932 году удалось разбить ядро лития (получив при этом две  $\alpha$ -частицы):



Ядерные реакции дали возможность искусственного превращения химических элементов. Кроме того, в продуктах реакций стали обнаруживаться новые, не известные ранее частицы. Например, при облучении бериллия  $\alpha$ -частицами в том же 1932 году был открыт нейтрон:



Нейтроны замечательно подходят для раскалывания ядер: не имея электрического заряда, они беспрепятственно проникают внутрь ядра<sup>1</sup>. Так, при облучении азота нейтронами протекает следующая реакция:



## Энергетический выход ядерной реакции

Обсуждая энергию связи, мы видели, что в результате ядерных процессов масса системы частиц не остаётся постоянной. Это, в свою очередь, приводит к тому, что кинетическая энергия продуктов ядерной реакции отличается от кинетической энергии исходных частиц.

Прежде всего напомним, что полная энергия  $E$  частицы массы  $m$  складывается из её энергии покоя  $mc^2$  и кинетической энергии  $K$ :

$$E = mc^2 + K.$$

Пусть в результате столкновения частиц  $A$  и  $B$  происходит ядерная реакция, продуктами которой служат частицы  $X$  и  $Y$ :



Полная энергия системы частиц сохраняется:

$$E_A + E_B = E_X + E_Y,$$

то есть

$$(m_A c^2 + K_A) + (m_B c^2 + K_B) = (m_X c^2 + K_X) + (m_Y c^2 + K_Y). \quad (6)$$

Кинетическая энергия исходных частиц равна  $K_A + K_B$ . Кинетическая энергия продуктов реакции равна  $K_X + K_Y$ . *Энергетический выход*  $Q$  ядерной реакции — это разность кинетических энергий продуктов реакции и исходных частиц:

$$Q = (K_X + K_Y) - (K_A + K_B).$$

Из (6) легко получаем:

$$Q = (m_A + m_B - m_X - m_Y)c^2. \quad (7)$$

Если  $Q > 0$ , то говорят, что реакция идёт с *выделением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *больше* кинетической энергии исходных частиц. Из (7) мы видим, что в этом случае суммарная масса продуктов реакции *меньше* суммарной массы исходных частиц.

Если же  $Q < 0$ , то реакция идёт с *поглощением энергии*: кинетическая энергия продуктов реакции *меньше* кинетической энергии исходных частиц. Суммарная масса продуктов реакции в этом случае *больше* суммарной массы исходных частиц.

Таким образом, термины «выделение» и «поглощение» энергии не должны вызывать недоумение: они относятся только к *кинетической* энергии частиц. Полная энергия системы частиц, разумеется, в любой реакции остаётся неизменной.

Чтобы посчитать энергетический выход  $Q$  ядерной реакции (5), действуем по следующему алгоритму.

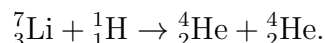
---

<sup>1</sup>При этом ускорять нейтроны не надо — медленные нейтроны легче проникают в ядра. Нейтроны, оказываясь, нужно даже замедлять, и делается это пропусканием нейтронов через обычную воду.

1. С помощью таблицы масс нейтральных атомов находим  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $m_X$  и  $m_Y$ , выраженные в а. е. м. (для нахождения массы ядра не забываем вычесть из массы нейтрального атома массу электронов).
2. Вычисляем массу  $m_1 = m_A + m_B$  исходных частиц, массу  $m_2 = m_X + m_Y$  продуктов реакции и находим разность масс  $\Delta m = m_1 - m_2$ .
3. Умножаем  $\Delta m$  на 931,5 и получаем величину  $Q$ , выраженную в МэВ.

Мы сейчас подробно рассмотрим вычисление энергетического выхода  $Q$  на двух примерах бомбардировки ядер лития  ${}^7_3\text{Li}$ : сначала — протонами, затем —  $\alpha$ -частицами.

В первом случае имеем уже упоминавшуюся выше реакцию (2):



Масса атома лития  ${}^7_3\text{Li}$  равна 7,01601 а. е. м. Масса электрона равна 0,000548 а. е. м. Вычитая из массы атома массу трёх его электронов, получаем *массу ядра лития*  ${}^7_3\text{Li}$ :

$$7,01601 - 3 \cdot 0,000548 = 7,01437 \text{ а. е. м.}$$

Масса протона равна 1,00728 а. е. м., так что масса исходных частиц:

$$m_1 = 7,01437 + 1,00728 = 8,02165 \text{ а. е. м.}$$

Переходим к продуктам реакции. Масса атома гелия равна 4,00260 а. е. м. Вычитаем массу электронов и находим *массу ядра гелия*  ${}^4_2\text{He}$ :

$$4,00260 - 2 \cdot 0,000548 = 4,00150 \text{ а. е. м.}$$

Умножая на 2, получаем массу продуктов реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00150 = 8,00300 \text{ а. е. м.}$$

Масса, как видим, уменьшилась ( $m_2 < m_1$ ); это означает, что наша реакция идёт с выделением энергии. Разность масс:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 8,02165 - 8,00300 = 0,01865 \text{ а. е. м.}$$

Выделившаяся энергия:

$$Q = 0,01865 \cdot 931,5 = 17,4 \text{ МэВ.}$$

Теперь рассмотрим второй пример. При бомбардировке ядер лития  $\alpha$ -частицами происходит реакция:



Массы исходных ядер нам уже известны; остаётся сосчитать их суммарную массу:

$$m_1 = 7,01437 + 4,00150 = 11,01587 \text{ а. е. м.}$$

Из таблицы берём массу атома бора  ${}^{10}_5\text{B}$  (она равна 10,01294 а. е. м.); вычитаем массу пяти электронов и получаем массу ядра атома бора:

$$10,01294 - 5 \cdot 0,000548 = 10,01020 \text{ а. е. м.}$$

Масса нейтрона равна 1,00867 а. е. м. Находим массу продуктов реакции:

$$m_2 = 10,01020 + 1,00867 = 11,01887 \text{ а. е. м.}$$

На сей раз масса увеличилась ( $m_2 > m_1$ ), то есть реакция идёт с поглощением энергии. Разность масс равна:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -0,0030 \text{ а. е. м.}$$

Энергетический выход реакции:

$$Q = -0,0030 \cdot 931,5 = -2,8 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, в реакции (8) поглощается энергия 2,8 МэВ. Это означает, что суммарная кинетическая энергия продуктов реакции (ядра бора и нейтрона) на 2,8 МэВ меньше, чем суммарная кинетическая энергия исходных частиц (ядра лития и  $\alpha$ -частицы). Поэтому чтобы данная реакция в принципе осуществилась, энергия исходных частиц должна быть не меньше 2,8 МэВ.

## Деление ядер

Бомбардируя ядра урана медленными нейтронами, немецкие физики Ган и Штрассман обнаружили появление элементов средней части периодической системы: бария, криптона, стронция, рубидия, цезия и т. д. Так было открыто *деление ядер* урана.

На рис. 1 мы видим процесс деления ядра<sup>2</sup>. Захватывая нейтрон, ядро урана делится на два осколка, и при этом освобождаются два-три нейтрона.

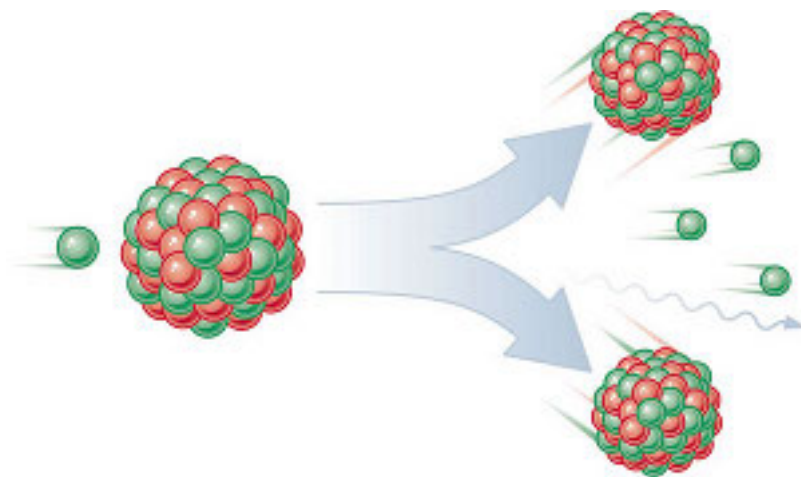


Рис. 1. Деление ядра урана

Осколки являются ядрами радиоактивных изотопов элементов середины таблицы Менделеева. Обычно один из осколков больше другого. Например, при бомбардировке урана  $^{235}_{92}\text{U}$  могут встречаться такие комбинации осколков (как говорят, реакция идёт по следующим *каналам*).

- Барий и криптон:  $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3 {}^1_0n$ .
- Цезий и рубидий:  $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{140}_{55}\text{Cs} + ^{94}_{37}\text{Rb} + 2 {}^1_0n$ .
- Ксенон и стронций:  $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 2 {}^1_0n$ .

В каждой из этих реакций выделяется очень большая энергия — порядка 200 МэВ. Сравните эту величину с найденным выше энергетическим выходом реакции (2), равным 17,4 МэВ! Откуда берётся такое количество энергии?

Начнём с того, что из-за большого числа протонов (92 штуки), упакованных в ядре урана, кулоновские силы отталкивания, распирающие ядро, очень велики. Ядерные силы, конечно, ещё в состоянии удерживать ядро от распада, но могучий кулоновский фактор готов сказать своё слово в любой момент. И такой момент настаёт, когда в ядре застревает нейтрон (рис. 2)<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>Изображение с сайта [oup.co.uk](http://oup.co.uk).

<sup>3</sup>Изображение с сайта [investingreenenergy.com](http://investingreenenergy.com).

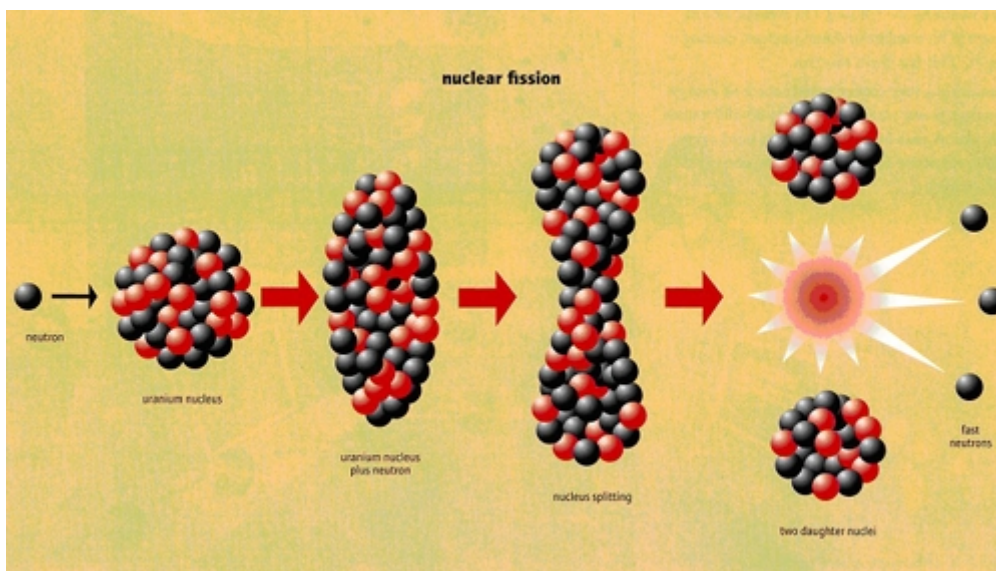


Рис. 2. Деформация, колебания и разрыв ядра

Застрявший нейтрон вызывает деформацию ядра. Начнутся колебания формы ядра, которые могут стать столь интенсивными, что ядро вытянется в «гантельку». Короткодействующие ядерные силы, скрепляющие небольшое число соседних нуклонов перешейка, не справятся с силами электрического отталкивания половинок гантельки, и в результате ядро разорвётся. Осколки разлетятся с огромной скоростью — около  $1/30$  скорости света. Они и унесут большую часть высвобождающейся энергии (около 170 МэВ из 200).

Деление тяжёлых ядер можно истолковать с точки зрения уже известного нам графика зависимости удельной энергии связи ядра от его массового числа (рис. 3).

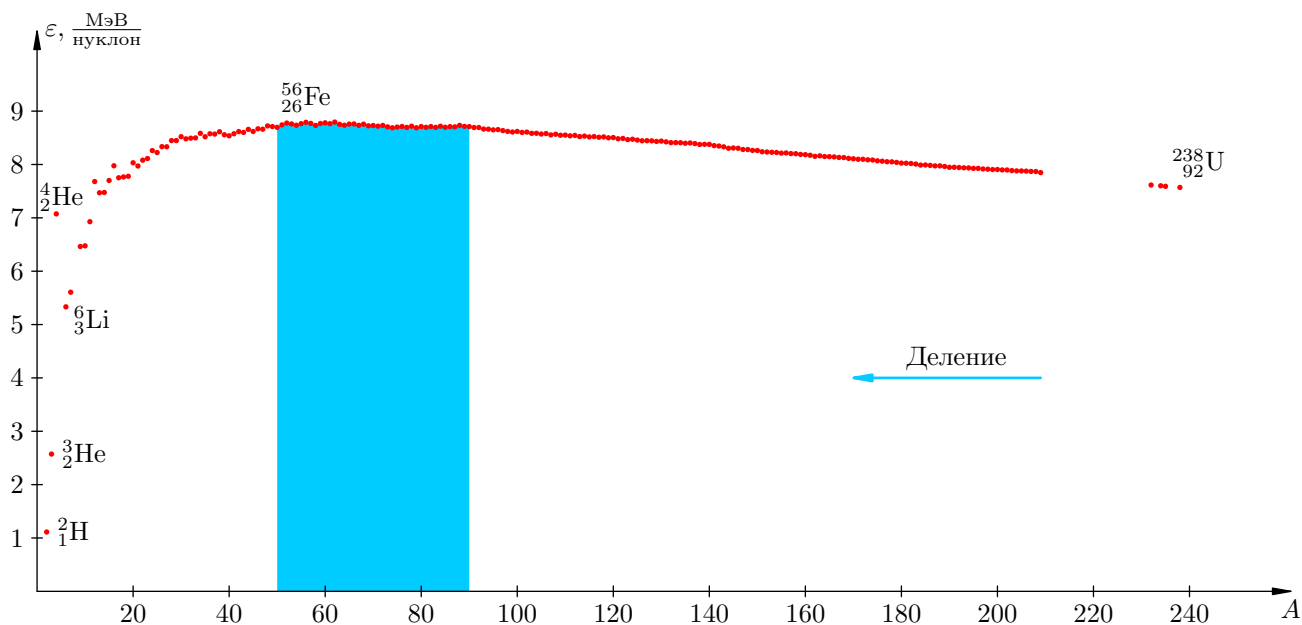


Рис. 3. Деление тяжёлых ядер энергетически выгодно

Цветом выделена область  $50 \leq A \leq 90$ , в которой удельная энергия связи достигает наибольшего значения 8,7 МэВ/нуклон. Это область наиболее устойчивых ядер. Справа от этой области удельная энергия связи плавно уменьшается до 7,6 МэВ/нуклон у ядра урана.

Процесс превращения менее устойчивых ядер в более устойчивые является энергетически выгодным и сопровождается выделением энергии. При делении ядра урана, как видим, удель-

ная энергия связи повышается примерно на 1 МэВ/нуклон; эта энергия как раз и выделяется в процессе деления. Умножив это на число нуклонов в ядре урана, получим приблизительно те самые 200 МэВ энергетического выхода, о которых говорилось выше.

## Цепная ядерная реакция

Появление двух-трёх нейтронов в процессе деления ядра урана — важнейший факт. Эти нейтроны «первого поколения» могут попасть в новые ядра и вызвать их деление; в результате деления новых ядер возникнут нейтроны «второго поколения», которые попадут в следующие ядра и вызовут их деление; возникнут нейтроны «третьего поколения», которые приведут к делению очередных ядер и т. д. Так идёт *цепная ядерная реакция*, в ходе которой высвобождается колоссальное количество энергии.

Для протекания цепной ядерной реакции необходимо, чтобы число  $N_i$  высвободившихся нейтронов в очередном поколении было не меньше числа  $N_{i-1}$  нейтронов в предыдущем поколении. Величина

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}$$

называется *коэффициентом размножения нейтронов*. Таким образом, цепная реакция идёт при условии  $k \geq 1$ . Если  $k < 1$ , то цепная реакция не возникает.

В случае  $k > 1$  происходит лавинообразное нарастание числа освобождающихся нейтронов, и цепная реакция становится *неуправляемой*. Так происходит взрыв атомной бомбы.

В ядерных реакторах происходит *управляемая* цепная реакция деления с коэффициентом размножения  $k = 1$ . Стационарное течение управляемой цепной реакции обеспечивается введением в активную зону реактора (то есть в ту область, где протекает реакция) специальных управляющих стержней, поглощающих нейтроны. При полностью введённых стержнях поглощение ими нейтронов настолько велико, что  $k < 1$  и реакция не идёт. В процессе запуска реактора стержни постепенно выводят из активной зоны, пока выделяемая мощность не достигнет требуемого уровня. Этот уровень тщательно контролируется, и при его превышении включаются устройства, вводящие управляющие стержни назад в активную зону.

## Термоядерная реакция

Наряду с реакцией деления тяжёлых ядер энергетически возможным оказывается и обратный в некотором смысле процесс — *синтез лёгких ядер*, то есть слияние ядер лёгких элементов (расположенных в начале периодической таблицы) с образованием более тяжёлого ядра.

Чтобы началось слияние ядер, их нужно сблизить вплотную — чтобы вступили в действие ядерные силы. Для такого сближения нужно преодолеть кулоновское отталкивание ядер, резко возрастающее с уменьшением расстояния между ними. Это возможно лишь при очень большой кинетической энергии ядер, а значит — при очень высокой температуре (в десятки и сотни миллионов градусов). Поэтому реакция ядерного синтеза называется *термоядерной реакцией*.

В качестве примера термоядерной реакции приведём реакцию слияния ядер дейтерия и трития (тяжёлого и сверхтяжёлого изотопов водорода), в результате которой образуется ядро гелия и нейтрон:



Эта реакция идёт с выделением энергии, равной 17,6 МэВ (попробуйте сами провести расчёты и получить данную величину). Это очень много, если учесть, что в реакции участвуют всего 5 нуклонов! В самом деле, в расчёте на один нуклон в реакции (9) выделяется энергия примерно 3,5 МэВ, в то время как при делении ядра урана выделяется «всего» 1 МэВ на нуклон.

Таким образом, термоядерные реакции служат источником ещё большего количества энергии, чем реакции деления ядер. С физической точки зрения это понятно: энергия реакции

ядерного деления есть в основном кинетическая энергия осколков, разогнанных *электрически-*ми силами отталкивания, а при ядерном синтезе энергия высвобождается в результате разгона нуклонов навстречу друг другу под действием куда более мощных *ядерных* сил притяжения. Проще говоря, при делении ядер высвобождается энергия электрического взаимодействия, а при синтезе ядер — энергия сильного (ядерного) взаимодействия.

В недрах звёзд достигаются температуры, подходящие для синтеза ядер. Свет Солнца и далёких звёзд несёт энергию, выделяющуюся в термоядерных реакциях — при слиянии ядер водорода в ядра гелия и последующем слиянии ядер гелия в ядра более тяжёлых элементов, расположенных в средней части периодической системы. Направление термоядерного синтеза показано на рис. 4; синтез лёгких ядер энергетически выгоден, так как направлен в сторону увеличения удельной энергии связи ядра.

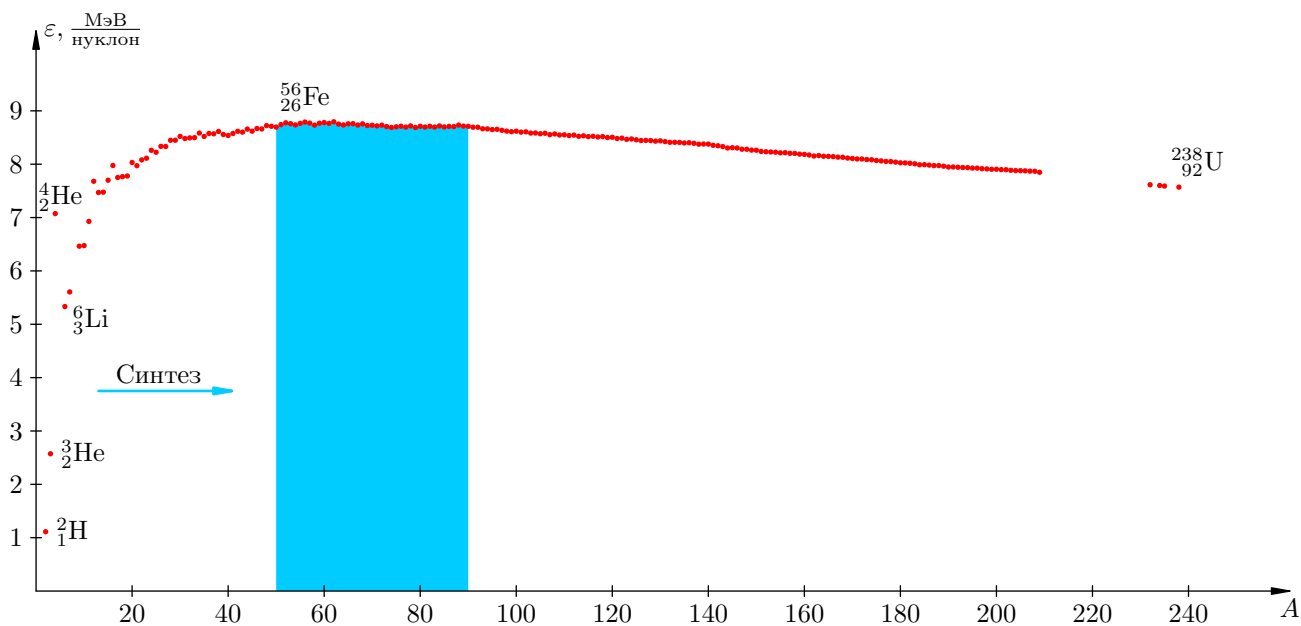


Рис. 4. Синтез лёгких ядер энергетически выгоден

Неуправляемая термоядерная реакция осуществляется при взрыве водородной бомбы. Сначала взрывается встроенная атомная бомба — это нужно для создания высокой температуры на первой ступени термоядерного взрыва. При достижении необходимой температуры в термоядерном горючем бомбы начинаются реакции синтеза, и происходит взрыв собственно водородной бомбы.

Осуществление управляемой термоядерной реакции остаётся пока нерешённой проблемой, над которой физики работают уже более полувека. Если удастся добиться управляемого течения термоядерного синтеза, то человечество получит в своё распоряжение фактически неограниченный источник энергии. Это чрезвычайно важная задача, стоящая перед нынешним и будущими поколениями — в свете угрожающей перспективы истощения нефтегазовых ресурсов нашей планеты.