

## 15. Заряд, масса, размер, и состав атомного ядра

В состав атомного ядра входят элементарные частицы: протоны и нейтроны (нуклоны)

Протон имеет положительный заряд

$$e^+ = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

и массу покоя

$$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 m_e.$$

Заряд ядра равен  $Ze$ ,

где  $e$  – заряд протона,  $Z$  – **зарядовое число**, равное **порядковому номеру** химического элемента в периодической системе элементов Менделеева, т.е. числу протонов в ядре.

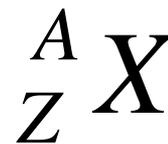
В настоящее время известны ядра с

$$Z = 1 \quad \text{до} \quad Z = 107 - 118$$

$A = Z + N$  называется **массовым числом**.

Ядра с одинаковым  $Z$ , но различными  $A$  называются **изотопами**.

Ядра, которые при одинаковом  $A$  имеют разные  $Z$  называются **изобарами**.



## 16. Энергия связи ядер. Дефект массы.

Ядерное сильное взаимодействие – притяжение – обеспечивающее устойчивость ядер несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.

Энергия связи ядра определяется величиной той работы, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.

$W_{\text{св}}$  – величина энергии, выделяющейся при образовании ядра,  
соответствующая ей масса  $\Delta m$ , равна:

$$\Delta m = \frac{W_{\text{св}}}{c^2} \quad (2)$$

называется **дефектом масс**.

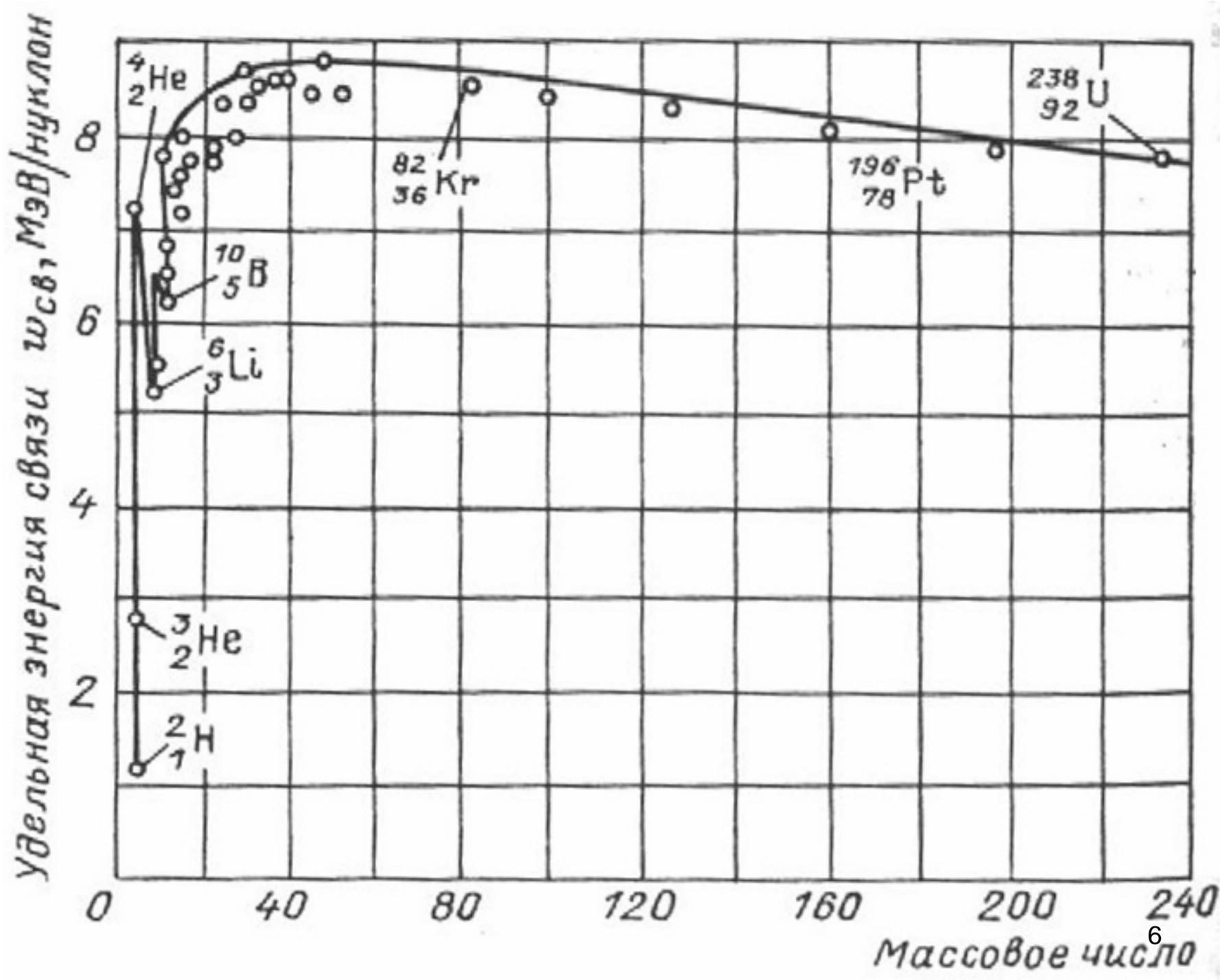
Если ядро массой  $M_{\text{яд}}$  образовано из  $Z$  протонов с массой  $m_p$  и из  $(A - Z)$  нейтронов с массой  $m_n$ , то

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}} \quad (3)$$

Удельной энергией связи ядра  $\omega_{\text{св}}$  называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A} \quad (4)$$

Величина  $\omega_{\text{св}}$  составляет в среднем 8 МэВ/нуклон (рис. 1).



Если ядро имеет наименьшую возможную энергию

$$W_{\min} = -W_{\text{св}},$$

ТО ОНО НАХОДИТСЯ В ОСНОВНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ.

Если ядро имеет энергию

$$W > W_{\min},$$

ТО ОНО НАХОДИТСЯ В ВОЗБУЖДЕННОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ.

Случай  $W = 0$  соответствует расщеплению ядра на составляющие его нуклоны.

## 17. Ядерные силы

Ядерные силы являются короткодействующими силами. Они проявляются лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами в ядре  $10^{-15}$  м.

- Длина  $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-15}$  м называется радиусом действия ядерных сил.

- Ядерные силы обнаруживают зарядовую независимость: притяжение между двумя нуклонами одинаково независимо от зарядового состояния нуклонов — протонного или нейтронного.

## Свойства ядерных сил:

- Малый радиус действия ядерных сил ( $a \simeq 1$  Фм).
- Большая величина ядерного потенциала  $V \sim 50$  МэВ.
- Зависимость ядерных сил от спинов взаимодействующих частиц.
- Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинового и орбитального моментов нуклона (спин-орбитальные силы).
- Ядерное взаимодействие обладает свойством насыщения.
- Зарядовая независимость ядерных сил.
- Обменный характер ядерного взаимодействия.
- Притяжение между нуклонами на больших расстояниях ( $r > 1$  Фм) сменяется отталкиванием на малых ( $r < 0,5$  Фм).

## 18. Радиоактивность

Радиоактивностью называется превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

# Таблица 1

<b>Тип радиоактивности</b>	Изменение Заряда ядра $Z$	Изменение массового числа $A$	Характер процесса
Альфа-распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет $\alpha$ -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
Бета-распад	$Z \pm 1$	$A$	Взаимные превращения в ядре нейтрона ( ${}^1_0n$ ) и протона ( ${}^1_0p$ )
$\beta_-$ – распад	$Z + 1$	$A$	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
$\beta_+$ – распад	$Z - 1$	$A$	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$
Электронный захват ( $e^-$ или К-захват)	$Z - 1$	$A$	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$  ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ – электронное нейтрино и антинейтрино. В скобках указаны частицы, вылетающие из ядра.
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	Деление ядра обычно на два осколка, имеющие приблизительно равные массы и заряды

## Закон радиоактивного распада:

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

$N_0$  – количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени  $t = 0$ ,

$N$  – число ядер в том же объеме к моменту времени  $t$ ,

$\lambda$  – постоянная распада,

Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях:

- постоянная распада не зависит от внешних условий;
- число ядер, распадающихся за время  $dt$ , пропорционально начальному количеству ядер<sub>12</sub>

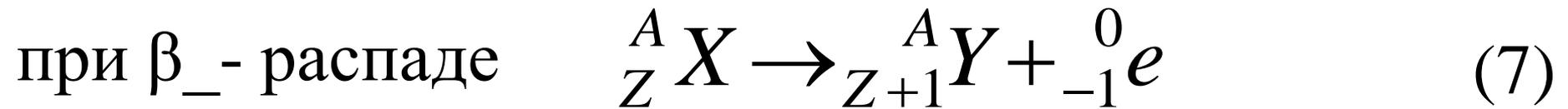
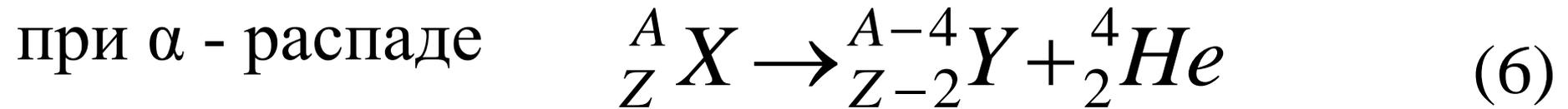
Характеристикой устойчивости ядер относительно распада служит период полураспада  $T_{1/2}$ .

Так называется время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества уменьшается наполовину.

Связь  $\lambda$  и  $T_{1/2}$ : (5)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693\tau$$

Правила смещения при радиоактивных  $\alpha$ - и  $\beta_-$  – распадах:



Здесь  ${}^A_Z X$  – материнское ядро,

$Y$  – символ дочернего ядра,

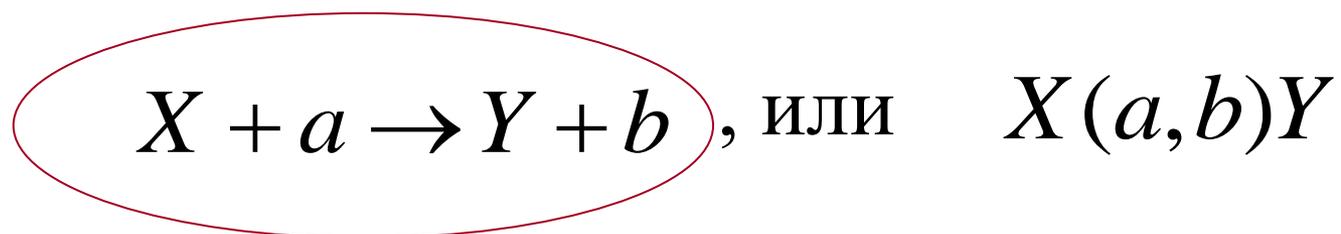
${}^4_2 He$  – ядро гелия,

${}^0_{-1} e$  – символическое обозначение электрона, для которого  $A = 0$  и  $Z = -1$ .

## 19. Ядерные реакции и их основные типы

Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с  $\gamma$ -квантами) или друг с другом.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где  $X$  и  $Y$  – исходные и конечные ядра,  $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В любой ядерной реакции выполняются: законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.

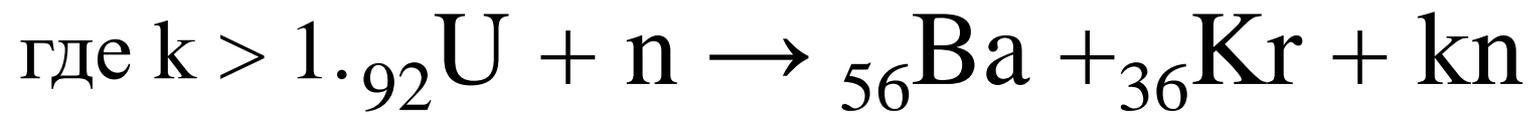
Выполняются также

- законы сохранения энергии,
- импульса,
- момента импульса.

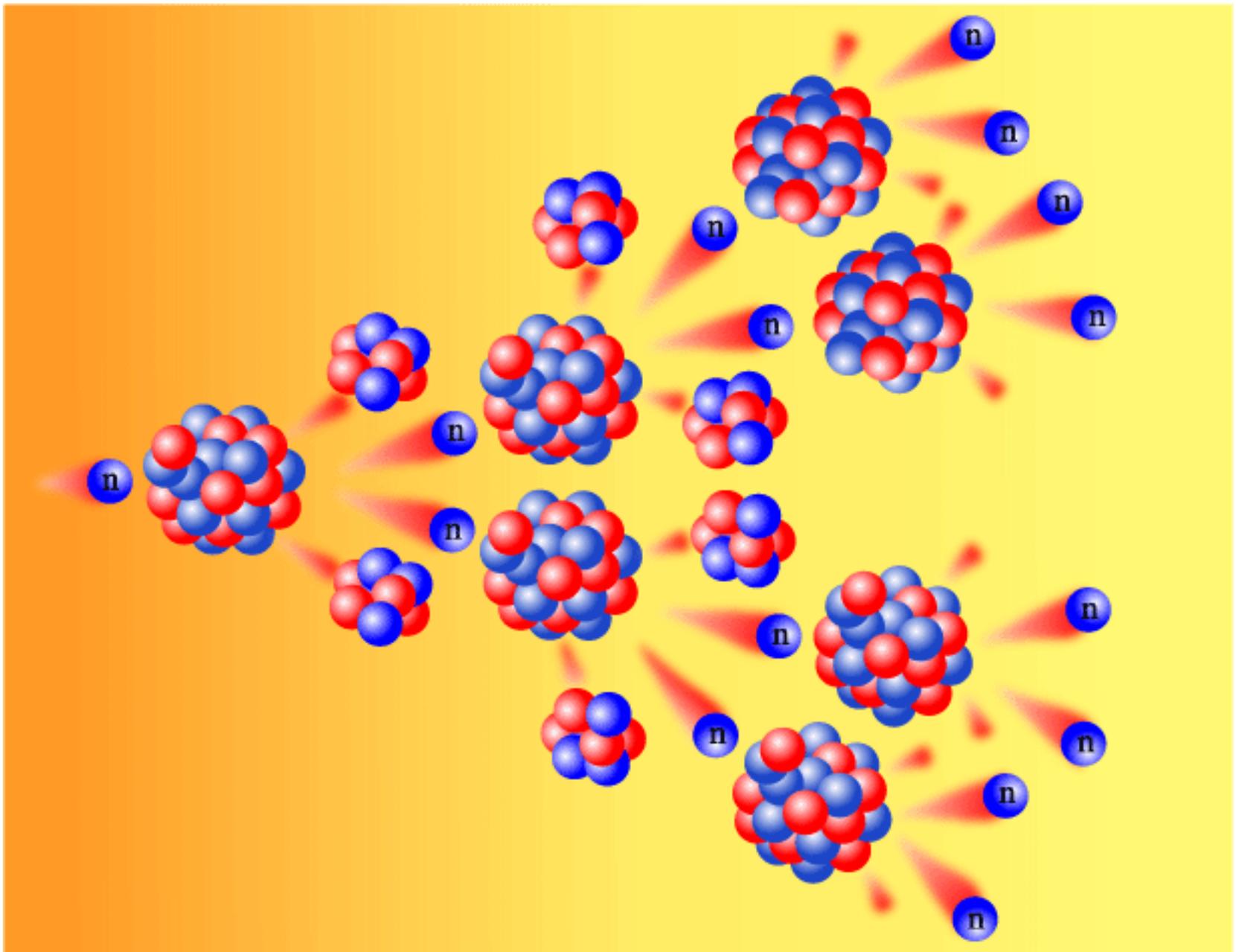
В отличие от радиоактивного распада, который всегда протекает с выделением энергии, ядерные распады могут быть как экзотермические (с выделением энергии), так и эндотермические (с поглощением энергии).

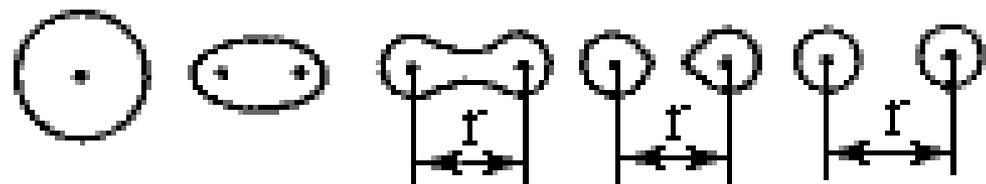
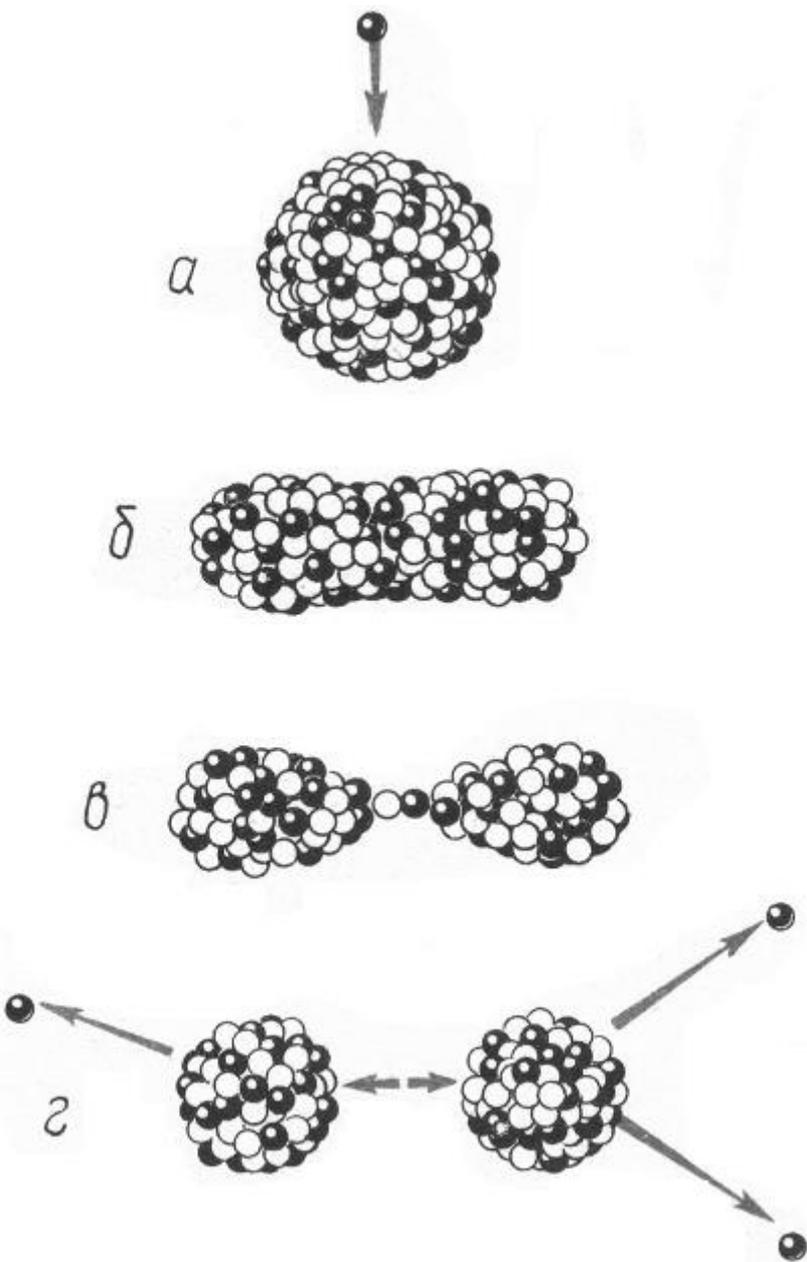
## 20. Деление ядер

Деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учёными Отто Ганом и Фрицем Штрассманом. При поглощении нейтронов ураном происходит деление ядра на два осколка.



При делении ядра урана тепловой нейтрон с энергией  $\sim 0,1$  эВ освобождает энергию  $\sim 200$  МэВ.





В процессе деления ядро изменяет форму — последовательно проходит через следующие стадии : шар, эллипсоид, гантель, два грушевидных осколка, два сферических осколка.

Как же добиться того, чтобы число нейтронов всё время оставалось постоянным? Для решения этой проблемы нужно знать, какие факторы влияют на увеличение и на уменьшение общего числа свободных нейтронов в куске урана, в котором протекает цепная реакция.

Одним из таких факторов является масса урана. Не каждый нейтрон, излучённый при делении ядра, вызывает деление других ядер. Если масса (и соответственно размеры) куска урана слишком мала, то многие нейтроны вылетят за его пределы, не успев встретить на своём пути ядро, вызвать его деление и породить таким образом новое поколение нейтронов, необходимых для продолжения реакции. В этом случае цепная реакция прекратится. Чтобы реакция не прекращалась, нужно увеличить массу урана до определённого значения, называемого критическим.

Чем больше масса куска, тем больше его размеры и тем длиннее путь, который проходят в нём нейтроны. При этом вероятность встречи нейтронов с ядрами возрастает. Соответственно увеличивается число делений ядер и число излучаемых нейтронов.

При критической массе урана число нейтронов, появившихся при делении ядер, становится равным числу потерянных нейтронов (т. е. захваченных ядрами без деления и вылетевших за пределы куска).

Поэтому их общее число остаётся неизменным. При этом цепная реакция может идти длительное время, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

• **Наименьшая масса урана, при которой возможно протекание цепной реакции, называется критической массой**

Если масса урана больше критической, то в результате резкого увеличения числа свободных нейтронов цепная реакция приводит к взрыву, а если меньше критической, то реакция не протекает из-за недостатка свободных нейтронов.

Уменьшить потерю нейтронов (которые вылетают из урана, не прореагировав с ядрами) можно не только за счет увеличения массы урана, но и с помощью специальной отражающей оболочки. Для этого кусок урана помещают в оболочку, сделанную из вещества, хорошо отражающего нейтроны (например, из бериллия). Отражаясь от этой оболочки, нейтроны возвращаются в уран и могут принять участие в делении ядер.

## 21. Синтез ядер

Масса или энергия покоя двух легких ядер оказывается больше, чем у суммарного ядра.

Если легкие ядра привести в соприкосновение, то результирующее ядро имело бы меньшую массу и высвободилась бы энергия, равная разности масс.

Например: Если соединить два дейтрона и получить ядро гелия, масса которого меньше суммарной массы двух дейтронов на 24 МэВ, то высвободится энергия синтеза 24 МэВ.

Процесс синтеза примерно в 6 раз эффективнее процесса деления урана.

В воде озер и океанов имеются неограниченные запасы недорогого дейтерия.

Серьезным препятствием на пути к получению энергии в неограниченных количествах из «воды» является закон Кулона.

Электростатическое отталкивание двух дейтронов при комнатной температуре не позволяет им сблизиться до расстояний, на которых сказываются короткодействующие ядерные силы притяжения.

Для получения управляемой термоядерной энергии и для инициирования термоядерного взрыва водородной бомбы необходима температура около  $5 \cdot 10^7$  К.

Ядерные реакции, требующие для своего осуществления температур порядка миллионов градусов, называются термоядерными.

Мгновенные температуры, развивающиеся при взрыве атомной бомбы, оказываются достаточно высокими, чтобы поджечь термоядерное горючее.

Вместо жидкого дейтерия в качестве горючего используется соединение LiD, причем только с изотопом  ${}^6\text{Li}$ .

Изотоп  ${}^6\text{Li}$  поглощает нейтроны, возникающие в реакции  ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + n$  таким образом,



Затем тритий ( ${}^3\text{T}$ ) вступает в реакцию



Происходит выгорание дешевого дейтерида лития-6 ( ${}^6\text{Li}$   ${}^2\text{D}$ ) с образованием  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  и нейтронов.

Начавшись, термоядерные реакции сопровождаются выделением энергии, и этим обеспечивается поддержание высоких температур, пока большая часть вещества быстро не «выгорит».

Происходит взрыв водородной бомбы. Термоядерное горючее для водородной бомбы (дейтерид лития-6) дешево, и нет ограничений на его количество при использовании в бомбе.

Проводились испытания бомб мощностью 60 мегатонн (с ТНТ-эквивалентом  $6 \cdot 10^7$  т).

Энерговыделение при взрыве термоядерной водородной бомбы можно почти удвоить (при этом стоимость ее увеличится не намного) за счет использования оболочки из  $^{238}\text{U}$ .

В этом случае нейтроны, возникающие в результате термоядерных реакций, вызывают деление ядер  $^{238}\text{U}$ , что приводит к увеличению числа нейтронов, бомбардирующих  $^6\text{Li}$ , и т.д.

В большинстве взрывов водородных бомб энерговыделение, обусловленное делением ядер, оказывается таким же, как и получаемое в процессе синтеза, и сопровождается опасными выпадениями радиоактивных продуктов деления.

Чтобы с помощью ядерного синтеза получить полезную энергию, термоядерные реакции должны быть управляемыми.

Необходимо найти способы создания и поддержания температур во много миллионов градусов.

Одна из технических проблем связана с тем, что высокотемпературный газ, или плазму, нужно удерживать таким образом, чтобы не расплавились стенки соответствующего объема.

У тяжелых ядер существует тенденция к делению на два более легких ядра с выделением энергии.

Если расщепляется тяжелое ядро на два более легких ядра, то их масса будет меньше массы родительского ядра на 0,1%.

Энергия атомной бомбы и ядерного реактора представляет собой энергию, высвобождающуюся при делении ядер.

В ядерной физике рассматриваются два процесса: - синтеза и деления ядер.

Если соединить два легких ядра, то масса суммарного ядра будет меньше суммы масс первоначальных ядер на  $\Delta M$  (дефект масс).

При соединении легкие ядра сольются с выделением энергии  $\Delta Mc^2$ . Этот процесс называется синтезом ядер. Разность масс может превышать 0,5%.

Энергия водородной бомбы – это энергия, выделяющаяся при ядерном синтезе.