

# **Омский государственный технический университет**

**Кафедра физики**

**Калистратова Л.Ф.**

**Электронные лекции по разделам оптики,  
квантовой механики, атомной и ядерной физики**

**9 лекций**

**(18 аудиторных часов)**

# Лекция 9.

## Ядерная физика

### План лекции

- 9.1. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.
- 9.2. Протоны и нейтроны. Строение ядра.
- 9.3. Ядерные силы. Модели строения ядра.
- 9.4. Энергия связи ядер. Удельная энергия связи.
- 9.5. Ядерные реакции. Способы получения атомной энергии.

## 9.1. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Ключом к изучению атомного ядра послужило открытие в 1896 году двух разных излучений.

Немецкий физик К. Рентген открыл излучение, способное беспрепятственно проникать через различные вещества (**рентгеновское излучение**);

Французский физик А. Беккерель, изучая люминесценцию различных веществ, обнаружил, что соли урана являются источником какого-то нового излучения, названного **радиоактивным излучением**.

Источником **урановых** лучей были уран, торий, радий, полоний и целый ряд других элементов.

# **Естественная радиоактивность**

**Радиоактивностью** называется явление самопроизвольного превращения одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием невидимых излучений.

**Радиоактивное излучение** обладает свойствами:

- имеет большую проникающую способность;
- воздействует на завёрнутую в чёрную бумагу фотопластинку;
- способно ионизовать воздух;
- сопровождается выделением тепла;
- вызывает свечение некоторых веществ.

## $\alpha$ - излучение

– поток ядер гелия



Заряд  $\alpha$  - частицы равен  $+2e$  ( $e$  – заряд электрона), масса равна 4 массам протона.

Энергия вылетающих из ядра  $\alpha$  - частиц велика и составляет (2-8) МэВ, скорости частиц - околосветовые.

На ионизацию 1 атома вещества  $\alpha$  - частица в среднем тратит 33 эВ.

На пути в 1 см она создает около  $1,3 \cdot 10^5$  пар ионов, следовательно, её энергия теряется очень быстро.

После того, как скорость  **$\alpha$  - частицы** уменьшается до скорости теплового движения, она теряет свои ионизационные свойства.

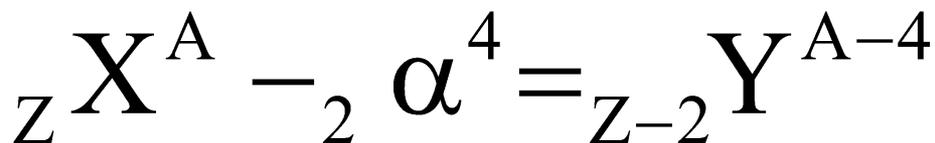
**Расстояние**, на котором энергия частицы уменьшается до энергии теплового движения, носит название **длины свободного пробега**.

Пробеги  **$\alpha$ - частиц** в воздухе составляют (2 – 10) см.

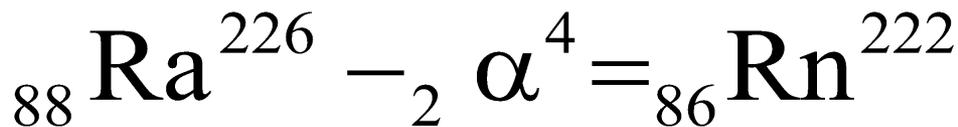
Таким образом, при **сильной ионизирующей способности  $\alpha$  - частицы** имеют **малую проникающую способность**.

При  **$\alpha$  - распаде** элемента возникает новый элемент с атомным весом на 4 единицы меньше исходного элемента и стоящий на 2 клетки ближе к началу таблицы Менделеева.

**$\alpha$  - распад** происходит по следующей схеме:



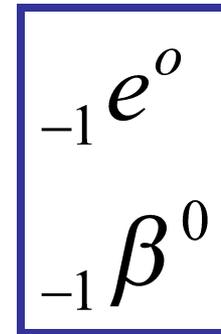
Например:



От  **$\alpha$ -частиц** легко защититься **картонным экраном**.

## $\beta$ – излучение

– поток электронов, скорости которых близки к скорости света ( $v = 0,999 c$ ).

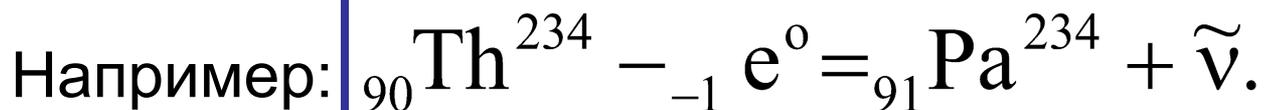
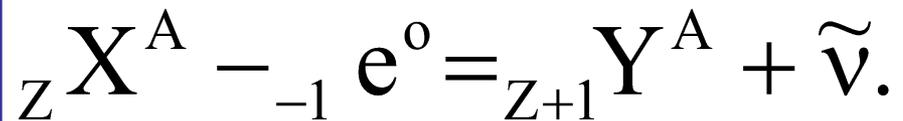


Благодаря большой скорости  $\beta$  - частицы пролетают мимо атома вещества за время  $(10^{-15})$  раз меньшее, чем  $\alpha$  - частица той же энергии.

Число пар ионов, образованных на пути в 1 см при прохождении  $\beta$  - частиц, в сотни раз меньше, чем при прохождении  $\alpha$  – частиц.

Свободный пробег в воздухе составляет около 1 м.

**Электронный распад** протекает по схеме:



$\tilde{\nu}$  - антинейтрино

**$\beta$  - частицы** обладают гораздо **большой проникающей способностью**, чем  $\alpha$  - частицы.

В качестве защиты от  **$\beta$ -излучения** используется **металлическая фольга**.

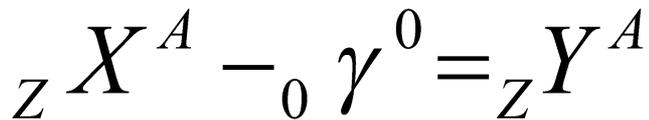
## γ-излучение

- короткие электромагнитные волны, длиной волны порядка  $(10^{-3} - 10^{-5})$  нм, распространяющиеся в воздухе со скоростью света.

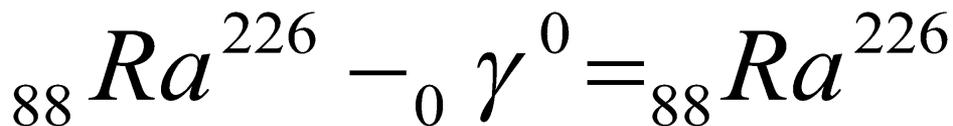


Они обладают **большой** проникающей способностью и **очень слабой** ионизирующей способностью.

**γ-излучение** не приводит к изменению порядкового номера элемента.



Например:



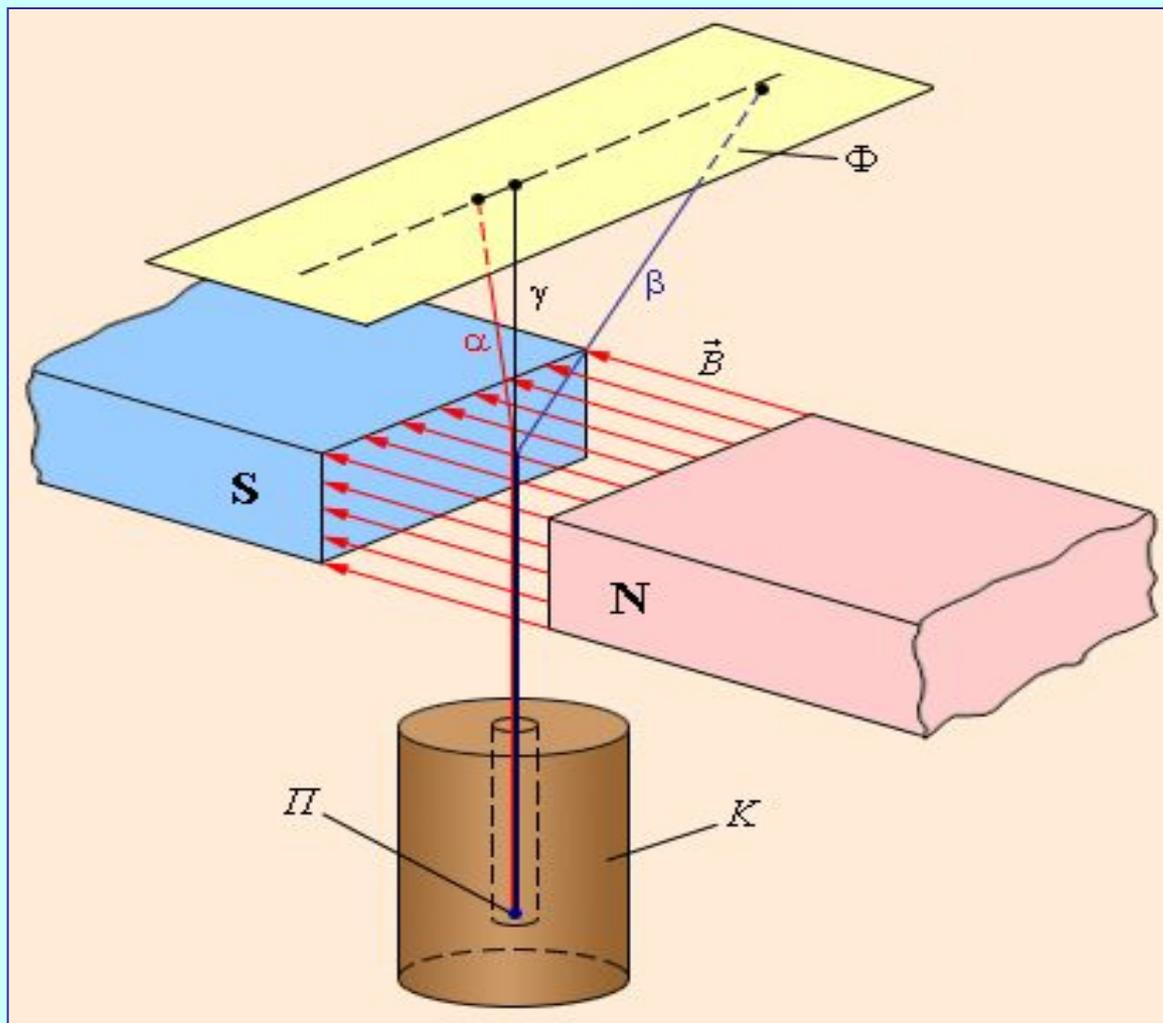
**$\gamma$  - излучение** вылетает из ядра при переходе ядра из возбуждённого состояния в основное.

**$\gamma$  - излучение** всегда сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$  - излучения.

Защитой от  **$\gamma$ -излучения** малой длины волны являются **металлические экраны, содержащие свинец.**

**Если интенсивность радиоактивного излучения значительно выше** существующей в нормальных условиях на поверхности земли и в атмосфере, то **оно оказывает вредное воздействие на живые организмы.**

# Разделение $\alpha$ -, $\beta$ - и $\gamma$ -излучений магнитным полем



## Искусственная радиоактивность

В 1934 году супругами Жолио-Кюри была открыта **искусственная радиоактивность**.

Ей присущи те же закономерности, что и естественной радиоактивности.

Однако, есть и различия: некоторые искусственно радиоактивные вещества испускают позитроны ( $e^+$ ).

Открытие полония и радия положило начало **НОВОЙ науке** о получении и свойствах радиоактивных элементов – **радиохимии**.

Получение тяжелых нестабильных элементов и изучение их свойств чрезвычайно важно для познания закономерностей, действующих в атомном ядре.

**Радиоактивные изотопы** получили широкое распространение в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, геологии и научных исследованиях.

**Радиоактивные излучения** применяются в качестве:

- радиоактивных индикаторов;
- источников излучения ( $\gamma$ -дефектоскопия в промышленности, лучевая терапия в медицине).

## Закон радиоактивного распада

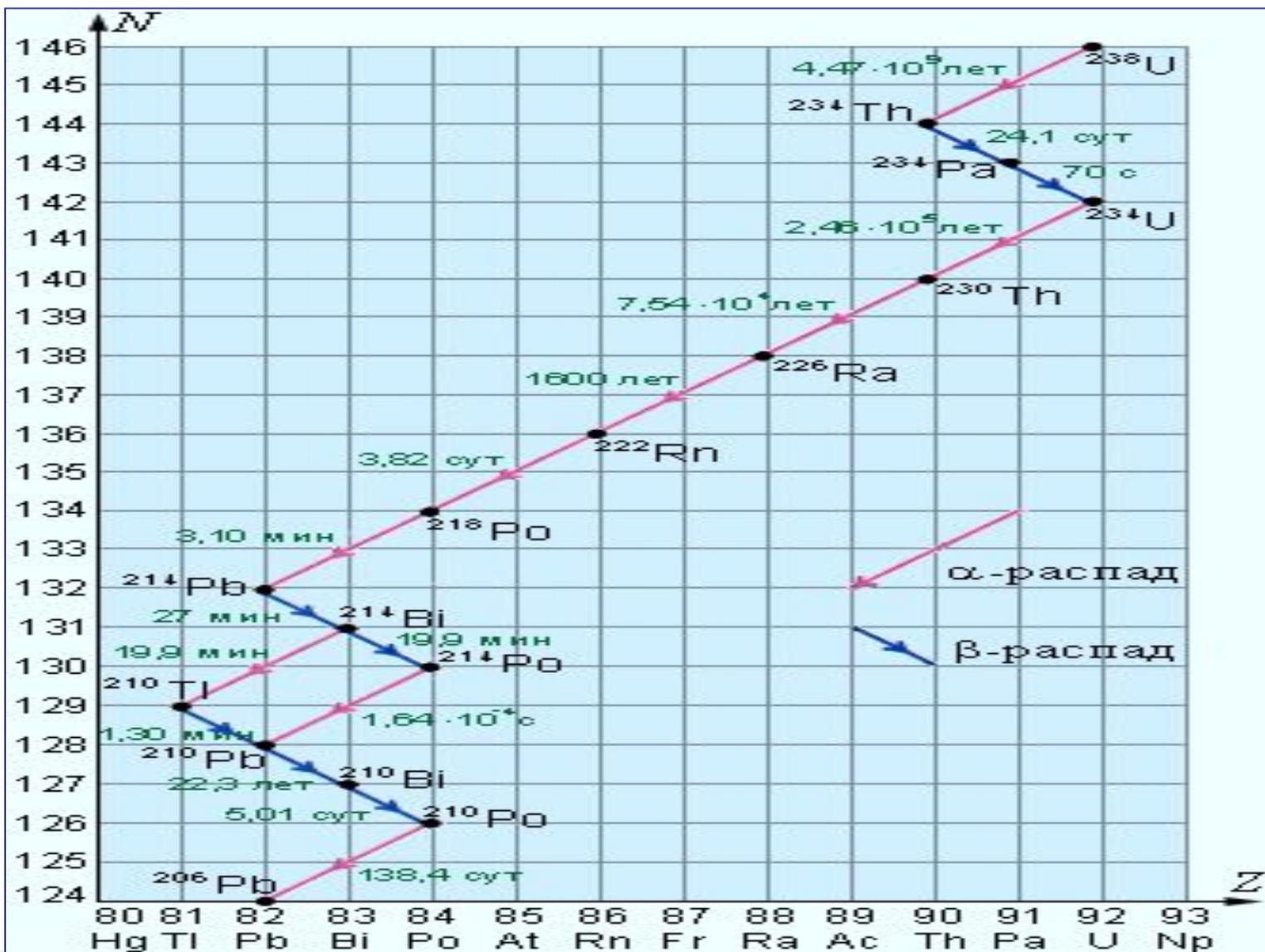
Почти все тяжёлые элементы периодической таблицы радиоактивны.

При последующих друг за другом превращениях получается радиоактивный ряд.

На Земле наиболее значительными являются **три радиоактивных ряда**: урана; тория; актиния.

Все три ряда оканчиваются нерадиоактивным свинцом, поэтому свинца в земной коре достаточно много.

# Схема распада радиоактивной серии



В обычных условиях **радиоактивный распад** не зависит от температуры и давления.

**Скорость распада** можно изменить:

- в результате воздействия быстрыми частицами;
- очень высокой температурой (порядка миллиона градусов).

**Распад радиоактивных ядер** происходит с определенной вероятностью.

Распады любых атомов одного и того же вещества равновероятны.

Мы не можем предсказать за какое время распадется то или иное ядро.

Однако, при наличии большого числа ядер, можно вычислить среднее количество ядер, которое подвергается радиоактивным превращениям в течение заданного интервала времени.

Пусть в момент времени  $t = 0$  число **нераспавшихся ядер** было  $N_0$ .

К моменту времени  $t$  число **нераспавшихся** ядер станет  $N$ .

Среднее число **нераспавшихся** ядер  $dN$   
**пропорционально** числу ядер  $N$  и времени распада  
 $dt$ :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

- $\lambda$  - **постоянная распада**,
- не зависящая от времени  $t$ ;
  - характеризующая конкретный радиоактивное вещество.

**Постоянная распада** равна **вероятности распада за единицу времени**.

Разделим переменные, проинтегрируем выражение, подставив пределы интегрирования.

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

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

**Закон радиоактивного распада:** число нераспавшихся ядер уменьшается со временем по экспоненциальному закону.

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

**Период полураспада** (T)- время, в течение которого распадается половина ядер.

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

**Периоды полураспада** радиоактивных элементов лежат в пределах **от многих лет до секунд**.

## График закона радиоактивного распада



$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

**Период полураспада  $T$  и постоянная распада  $\lambda$ :**

- **не зависят** от начального количества радиоактивного вещества;
- **характеризуют** сам радиоактивный элемент.

**Число ядер, распавшихся к моменту времени  $t$ :**

$$N_p = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

**Активность радиоактивного препарата** - число распадов в единицу времени:

$$a = \frac{dN}{dt}$$

Она прямо пропорциональна числу **нераспавшихся** ядер в данный момент времени:

$$a = -\lambda N$$

Так как  $N$  уменьшается со временем, значит и **активность препарата** уменьшается со временем по экспоненциальному закону:

$$a = a_0 e^{-\lambda t}$$

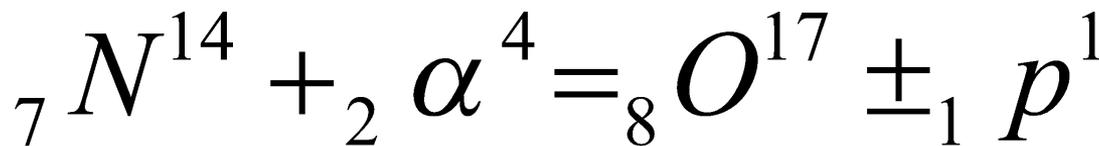
## 9.2. Протоны и нейтроны. Строение ядра

**Ядерной реакцией** называется взаимодействие частиц с веществом мишени.

В 1919 году Резерфордом была осуществлена **первая ядерная реакция**, в которой был зарегистрирован **протон**.

**Протон** - вторая элементарная частица, открытая после электрона.

**Ядерная реакция** проходила по схеме:



## Протон

Обозначается символом:  ${}_1\text{p}^1$  ;

- имеет массу:  $m_p = 1,00813 \text{ а.е.м.}$  ;

- имеет положительный заряд:

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

- имеет спин :  $S=1/2$ .

**Протон** - стабильная частица, живущая бесконечно долго.

## Протон

имеет **собственный магнитный момент:**

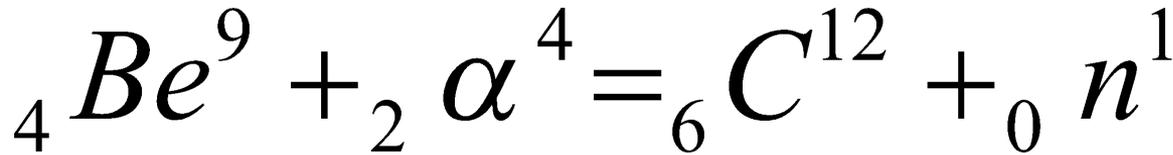
$$\mu_p = +2,79\mu_y$$

$$\mu_y = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,03 \cdot 10^{-27} \text{ Дж / Тл}$$

- ядерный магнетон;

**Собственные магнитный и механический моменты направлены в одну сторону;**

В 1932 году английский физик Д.Чедвик обнаружил в ядерной реакции поток новых частиц, названных **нейтронами**.



Открытие нейтрона совершило решительный поворот в физике атомного ядра.

Оно открыло колоссальные возможности для изучения свойств ядра:

- для получения новых ядерных реакций;
- привело к созданию модели атомного ядра.

## Нейтрон

Обозначается символом:  ${}_0\text{n}^1$  ;

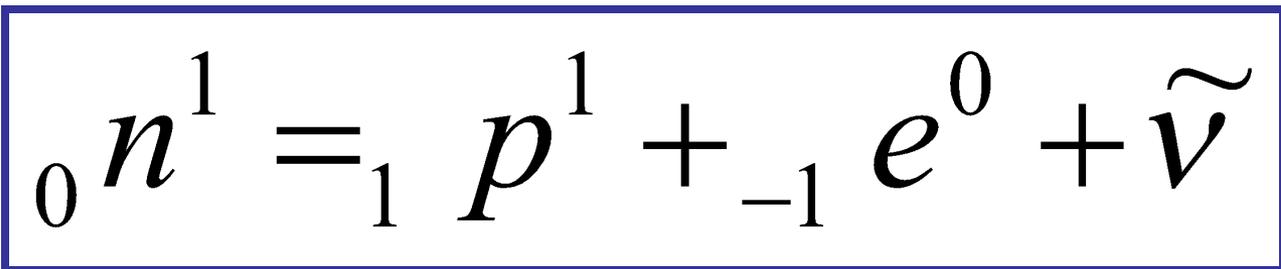
- имеет массу:  $m_n = 1,00898 \text{ а.е.м.}$  ;

- не имеет заряда:  $q_n = 0$

- имеет спин:  $S = 1/2$

Нестабильная частица с периодом полураспада  
 **$T = 12$  мин.**

Распад **нейтрона** ( $\beta$  - распад) происходит по схеме:



**Нейтрон** имеет **собственный магнитный момент**:

$$\mu_n = -1,91\mu_y$$

**Собственный магнитный и механический моменты направлены в противоположные стороны.**

## Строение ядра

В 1932 году Д.Д.Иваненко и независимо от него Гейзенберг предложили гипотезу, согласно которой **атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.**

Для обозначения ядер применяют символ:



Важнейшие характеристики ядра:

- заряд **Z** ;
- масса **A** .

Например:



Протон и нейтрон назвали одной частицей – **нуклоном**.

**Ядро состоит из нуклонов.**

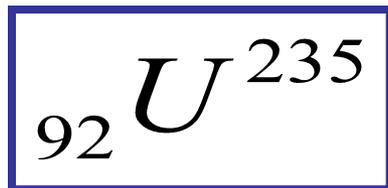


**A** – число всех частиц (число нуклонов);

**Z** - число протонов;

**A – Z = N** – число нейтронов.

Например:



Ядро урана имеет:

**235** нуклона;

**92** протона;

**235 - 92 = 143** нейтрона.

Для ядер элементов до середины периодической таблицы **число нейтронов, примерно равно числу протонов:**

$$\frac{N}{Z} = \frac{A - Z}{Z} \approx 1$$

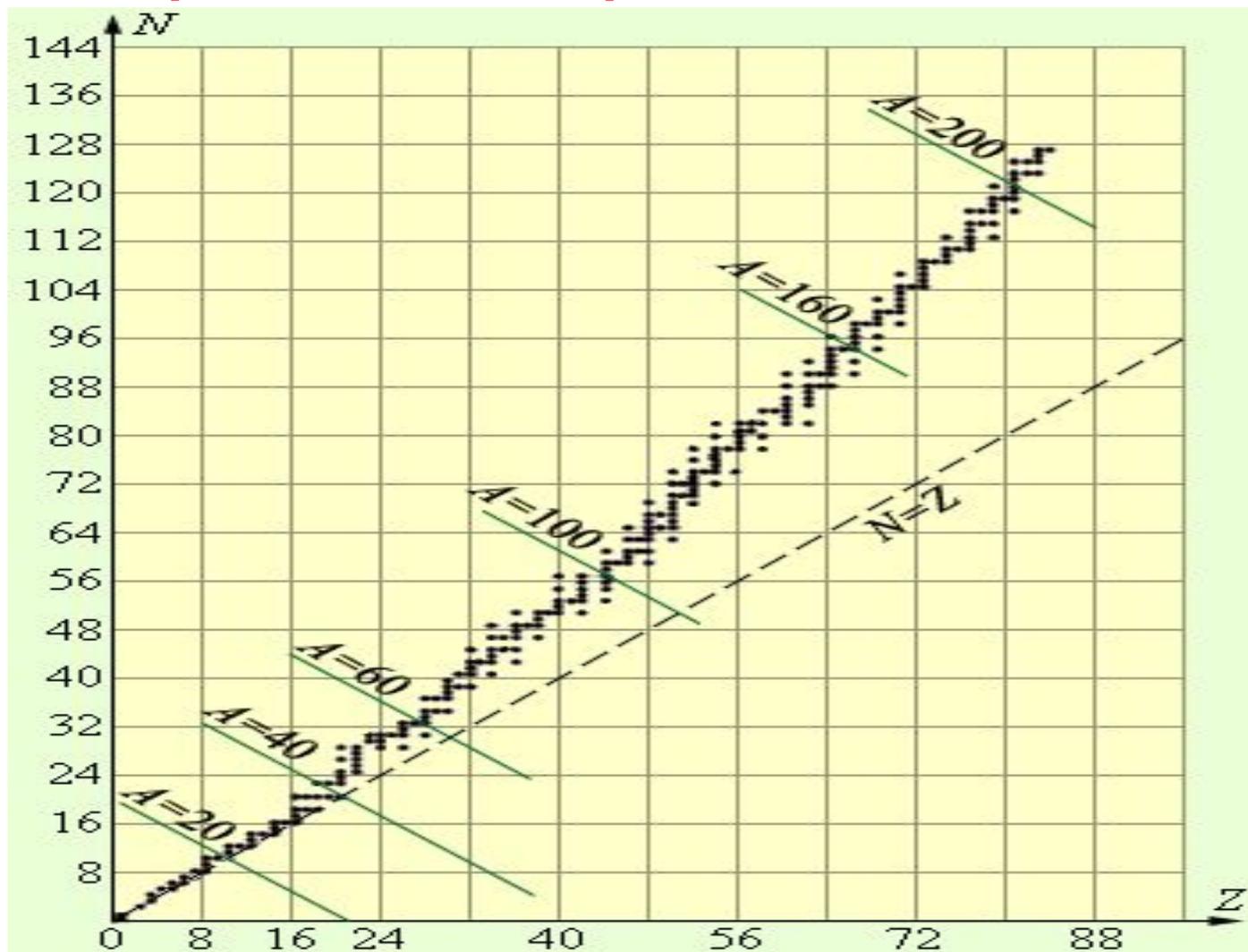
Например для кислорода  ${}_8\text{O}^{16}$  отношение равно 1.

По мере утяжеления ядер с ростом массового числа **количество нейтронов в ядре преобладает над числом протонов:**

$$\frac{A - Z}{Z} \approx 1,6.$$

Например для урана  ${}_{92}\text{U}^{238}$  отношение равно 1,63.

# Числа протонов и нейтронов в стабильных ядрах



## Изотопы

– элементы, имеющие одинаковое число протонов, но разное число нейтронов.

Изотопы кислорода:  ${}_8\text{O}^{16}$  ,  ${}_8\text{O}^{17}$  ,  ${}_8\text{O}^{18}$  .

Открытие изотопов с большой остротой поставило вопрос об установлении наиболее рациональной единицы атомной массы.

**Единица атомной массы** равна 1/12 массы атома углерода .

$$\text{а.е.м} = 1,6603 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

## 9.3. Ядерные силы. Модели строения ядер

**В атомных ядрах** силы электрического отталкивания протонов очень велики, но нуклоны не разлетаются, они **очень сильно связаны между собой**.

Например, в ядре атома гелия величина сил отталкивания двух протонов составляет примерно 200 Н.

$$F = \frac{ke^2}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} \approx 200 \text{ Н}$$

**Плотность ядерного вещества огромна** и практически не зависит от массового числа!

Для ядра гелия она составляет величину:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi \cdot (2 \cdot 10^{-15})^3} \approx$$
$$\approx 2 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

Взаимодействие нуклонов в ядре носит **характер притяжения**. Оно удерживает нуклоны на расстояниях порядка  **$10^{-15}$**  м друг от друга.

**Ядерное взаимодействие** получило название **сильного взаимодействия**.

## **Свойства ядерных сил**

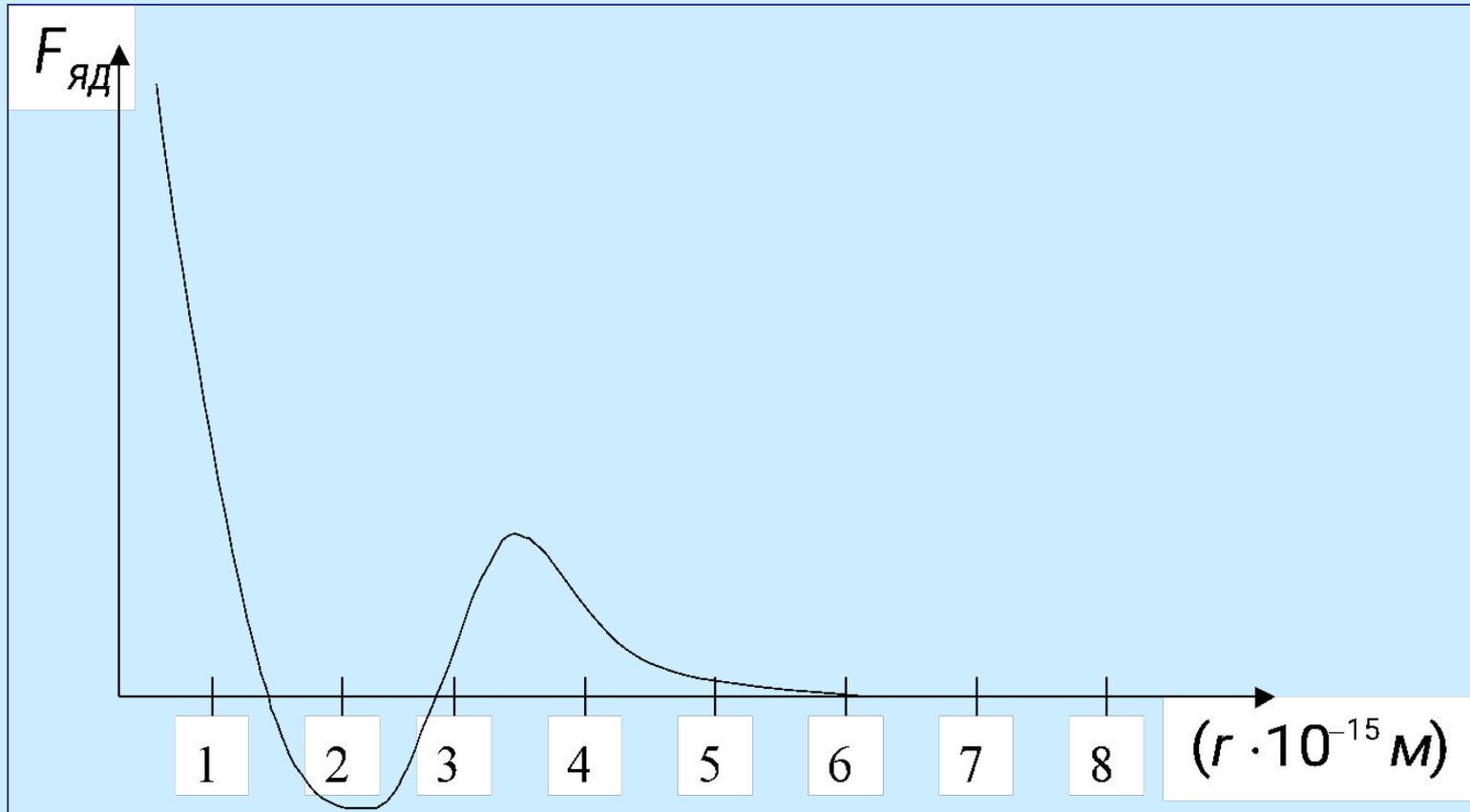
**Ядерные силы** являются короткодействующими.

Радиус действия ядерных сил оценивается как  $10^{-15}$  м

**Ядерные силы** гораздо быстрее меняются с расстоянием, чем гравитационные и кулоновские силы:

$$F_{\text{яд}} \approx \frac{1}{r^n}, \text{ где } n > 4.$$

**Ядерные силы** сложным образом зависят от расстояния между нуклонами.



На рисунке положительное значение функции соответствует отталкиванию нуклонов, а отрицательное – их притяжению.

## Ядерные силы

- **не зависят от знака и величины заряда:** они действуют между протонами и нейтронами одинаковым образом;
- **не являются центральными;**
- **зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов;**
- **обладают свойством насыщения, как и химические силы. Насыщение ядерных сил наступает при четырёх взаимодействующих нуклонах.**

## Природа ядерных сил

В 1935 году японский физик Х. Юкава выдвинул гипотезу о том, что роль **переносчиков ядерного взаимодействия** выполняют особые частицы, названные  $\pi$  - мезонами (пионами).

В то время в природе эти частицы не были обнаружены.

Найденные позже в космических лучах свободные  $\pi$  - мезоны совпали по своим характеристикам с частицами, предсказанными Юкавой.

## Пионы

**Заряд пиона** равен **заряду электрона**; при этом пионы могут быть:

- нейтральными,
- отрицательно заряженными,
- положительно заряженными.

**Массы** свободных пионов:

$$\pi^0 = 264m_e$$

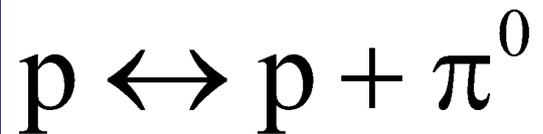
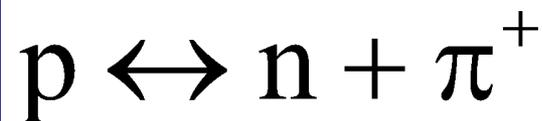
$$\pi^+, \pi^- = 273m_e$$

**Спин** всех пионов равен **нулю**:  $S=0$ .

Пионы - **частицы нестабильные**: время жизни  $\pi^0$ -мезона  $10^{-16}$  с; остальных мезонов -  $10^{-8}$  с.

В современной теории ядерных сил принимается, что **взаимное притяжение нуклонов обусловлено пионами.**

Поглощение пионов нуклонами приводит к сильному взаимодействию между ними.



Пион испускается одним нуклоном и сразу поглощается соседним нуклоном за время  $10^{-23}$  с.

В результате таких мгновенных **виртуальных процессов** нуклон оказывается окруженным облаком виртуальных  $\pi$  - мезонов.

**Виртуальной** называется частица, которая не может быть зарегистрирована за время своего существования ( $10^{-23}$  с).

**Виртуальным** называется переход из одного состояния в другое за очень короткое время ( $10^{-23}$  с).

## Капельная модель строения ядра

К современным моделям строения атомных ядер относятся **капельная** (1936 г., Я. И. Френкель) и **оболочечная** (1932 г., Д. Д. Иваненко. ) модели.

В опытах по рассеянию нуклонов атомными ядрами и в явлениях, связанных с проникновением нуклонов в вещество, **ядра ведут себя во многих отношениях подобно каплям жидкости.**

Внутри ядра плотность ядерного вещества примерно одинакова (как у жидкости).

На границе ядра действуют силы, препятствующие выходу нуклонов из ядра(как у жидкости).

Это напоминает **явление поверхностного натяжения в жидкостях.**

Величину энергии связи нуклонов можно сравнить с теплотой испарения жидкостей.

Разумеется, силы поверхностного натяжения в ядре в миллионы раз больше сил поверхностного натяжения в жидкостях.

Исходя из расчётов капельной модели, **радиус ядра** приближённо оценивается как

$$r = r_0 A^{1/3}$$

где  $A$  - массовое число ядра,

$$r_0 = (1,3 + 1,4) \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

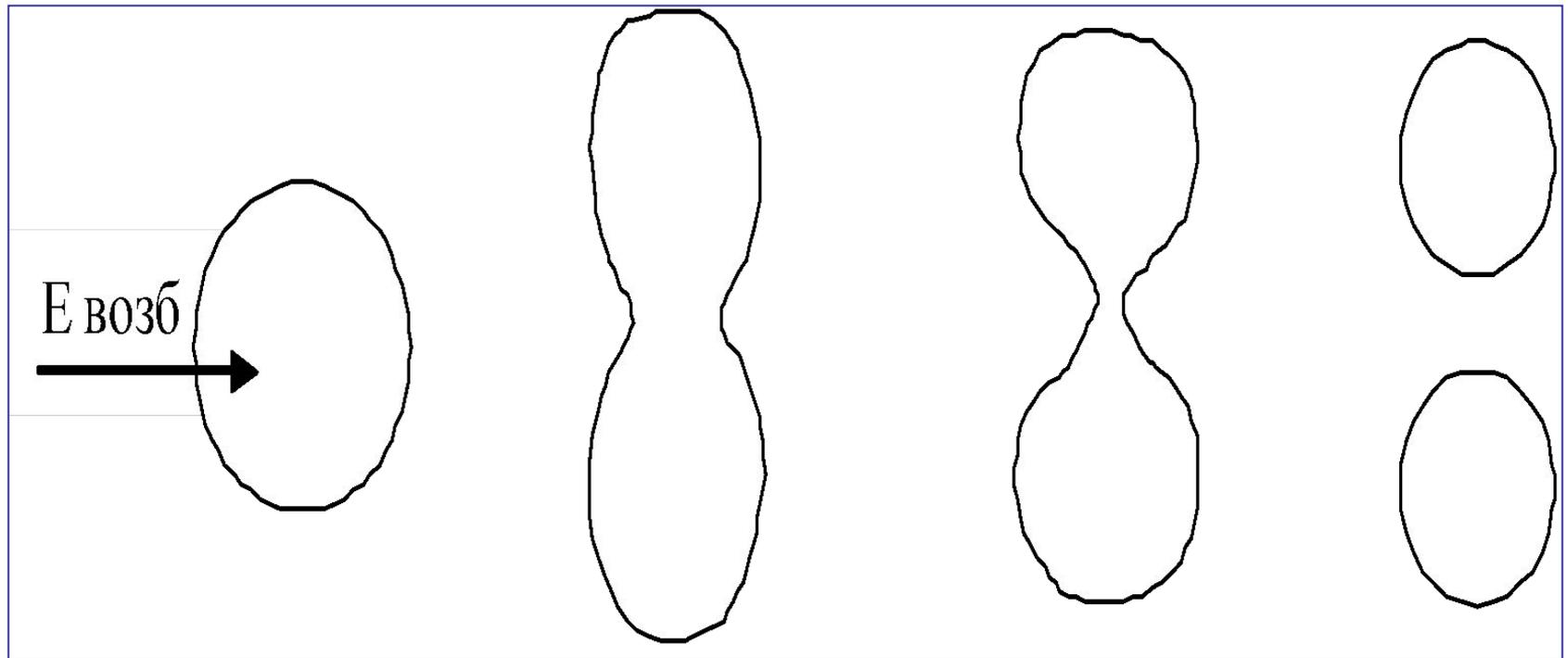
**Капельная модель ядра** позволяет объяснить процесс деления тяжелых ядер.

Тяжелые ядра могут делиться на две примерно равные части, освобождая при этом большое количество энергии.

**Возбужденное тяжёлое ядро ведет себя подобно жидкости.** При делении возбуждённого ядра образуется **перешеек (как при отрыве капли)**, делящий ядро на равные части.

На последней стадии деления ядро разрывается по наиболее ослабленному месту ядра, то есть в области перешейка.

## Процесс деления тяжёлого ядра



Капельная модель не в состоянии объяснить явления, связанные с периодичностью свойств ядер.

## Оболочечная модель строения ядра

Экспериментальным путем показано, что важнейшие свойства ядер, такие как:

- **дефект масс;**
- **стабильность;**
- **распространенность в природе;**
- **энергия связи;**
- **число изотопов**

периодически изменяются с увеличением числа протонов и соответственно нейтронов.

Особенно **стабильны** и имеют много изотопов **ядра элементов**, у которых **число протонов равно числу нейтронов.**

К таким ядрам относятся ядра **гелия, кислорода, кальция, олова и свинца.**

Число протонов:	2	8	20	50	82	126
Элемент:	${}^4_2\text{He}$	${}^{16}_8\text{O}$	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	${}^{100}_{50}\text{Sn}$	${}^{164}_{82}\text{Pb}$	?

Числа **2, 8, 20, 50, 82, 126**  
– получили название **магических.**

Они соответствуют ядерным состояниям, в которых некоторые **“нуклонные” оболочки** оказываются **завершенными.**

Идея о ядерных оболочках базируется на том, что **состояния нуклонов в ядре можно описать набором 4-х квантовых чисел**, по аналогии с состояниями электронов в атомах.

**Атомное ядро может находиться в основном состоянии** сколь угодно долго.

При переходе ядра из возбужденного состояния в основное ядро испускает квант электромагнитного излучения (  $\gamma$  - квант).

Нуклоны в ядре образуют группы – **оболочки** – с ограниченным числом нуклонов.

Оболочки, различающиеся главным квантовым числом **n**, содержат соответственно следующее число нуклонов:

**n = 1**: состояние 1s содержит **2** нуклона (протон и нейтрон);

**n = 2**: состояния 2s и 2p содержат соответственно 2 и 6 нуклонов, всего их **8**;

**n = 3**: состояния 3s, 3p и 3d содержат соответственно 2, 6 и 10 нуклонов, всего их **18**.

Следующие оболочки содержат **32, 50, 98** и т.д. нуклонов.

Этот ряд чисел практически соответствует ряду магических чисел с некоторыми отклонениями. Но такие же отклонения наблюдаются и при заполнении электронных оболочек в атомах.

В настоящее время идея ядерных оболочек является общепринятой, хотя окончательно не завершённой.

Итак, ни оболочечная, ни капельная модель не в состоянии описать все свойства ядер.

Возможно, что структура атомного ядра различна в основном и возбуждённом состояниях, так что **основное состояние** отвечает оболочечной модели, а **возбуждённое состояние** более отвечает капельной модели ядра.

Не удалось ещё создать **единой теории** многообразных и находящихся в сложной зависимости между собой **свойств атомных ядер**.

## 9.4. Энергия связи ядер. Удельная энергия связи

### Энергия связи ядра

- равна работе, которую нужно совершить для расщепления ядра на составляющие его отдельные нуклоны.
- вычисляется по формуле:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2$$

$\Delta m$  - дефект массы ядра,  $c$  – скорость света в вакууме.

**Дефект массы** равен разности между общей массой свободных невзаимодействующих нуклонов и массой ядра.

**Дефект массы** вычисляется по формуле:

$$\Delta m = \left[ Zm_p + (A - Z)m_n \right] - m_{\text{я}}$$

При образовании ядра масса частиц уменьшается на  $\Delta m$ , что соответствует выделению энергии, равной энергии связи  $E_{\text{св}}$ .

Практически для вычисления энергии связи используют следующую формулу:

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

В этой формуле: **масса** измеряется в атомных единицах массы (**а.е.м.**), а **энергия** в мегаэлектронвольтах (**МэВ**).

**Энергия связи** возрастает при увеличении числа нуклонов.

В качестве характеристики связанности нуклонов в ядре удобно использовать понятие удельной энергии связи.

**Удельная энергия связи** – энергии, приходящаяся на один нуклон.

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$$

**Удельная энергия связи** для всех элементов различна, но её значение **не превышает**

**9 МэВ/нуклон.**

## Удельная энергия связи ядер



**Выделением энергии (атомной энергии)** связано с процессом

- объединения меньших ядер в большие (термоядерный синтез);
- расщепления тяжёлых ядер, относящихся к концу периодической таблицы (реакция деления тяжёлых ядер).

Необходимо подчеркнуть, что энергетические соотношения говорят о **ВОЗМОЖНОСТИ** выделения энергии.

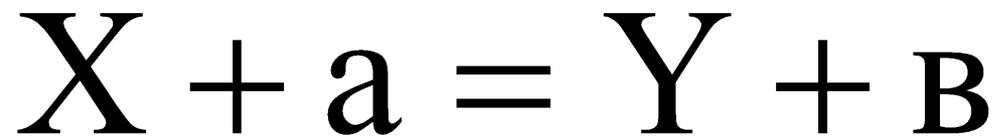
**Осуществление** же этих процессов зависит в значительной степени от других факторов.

## 9.5. Ядерные реакции. Способы получения атомной энергии

**Ядерной реакцией** называется процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей, приводящий к образованию новых ядер.

**Ядерные реакции** осуществляются путем “бомбардировки” подвергаемых превращениям ядер, частицами высоких энергий (протонами, нейтронами,  $\alpha$  - частицами,  $\gamma$  - квантами).

Наиболее распространенным видом **ядерной реакции** является реакция взаимодействия легкой частицы «а» с ядром X, в результате которой образуется легкая частица «в» и ядро Y:



Коротко эта реакция записывается как



Если испущенная в результате реакции частица тождественна с захваченной ( $a = b$ ), то процесс называют **рассеянием**.

**Рассеяние** может быть **упругим**: частица не вызывает изменения ни энергии, ни состава ядра, она изменяет только направление своего движения.

**Рассеяние** может быть **неупругим**: частица вызывает изменения как своей энергии, так и энергии ядра.

**Ядерные реакции** делятся на 2 группы в зависимости от энергии бомбардирующих частиц:

- относительно “малая” энергия (меньше 50 МэВ);
- “большая” энергия (больше 50 МэВ).

По механизмам протекания реакции эти две группы существенно различны.

Очень **быстрые частицы** вызывают протекание реакции через возникновение промежуточного компаунд ядра (компаунд – ядра):



**Ядерные реакции**, вызываемые частицами малой энергии, разделяются на группы в зависимости от вида бомбардирующих частиц:

- а) процесс **протонного захвата**;
- б) процесс **нейтронного захвата**;
- в) **фотоядерные** реакции и т.д.

Наиболее важными среди указанных реакций являются реакции под действием нейтронов.

**Ядерные реакции** могут **сопровождаться** как **выделением** тепла, так и его **поглощением**.

Важной характеристикой **ядерной реакции** является ее **эффективность**.

**Эффективность реакции** - отношение числа частиц, вызвавших ядерное превращение, к общему числу бомбардирующих частиц.

**Эффективность** взаимодействия в ядерной физике принято характеризовать величиной **эффективного сечения** .

**Эффективное сечение** реакции зависит как от вида бомбардирующих частиц, так и от вида ядер мишени.

## Цепная реакция деления тяжелых ядер

1. Под воздействием медленных (тепловых) нейтронов делятся многие ядра: торий, протактиний, плутоний, уран.
2. **Уран-238** делится под воздействием очень **быстрых нейтронов**, **уран-235** делится под воздействием **медленных нейтронов**.
3. **В результате реакции деления образуются осколки деления.** Наиболее вероятным является деление, при котором массы осколков относятся как 2 : 3.
4. **Сам уран и продукты его деления радиоактивны.**

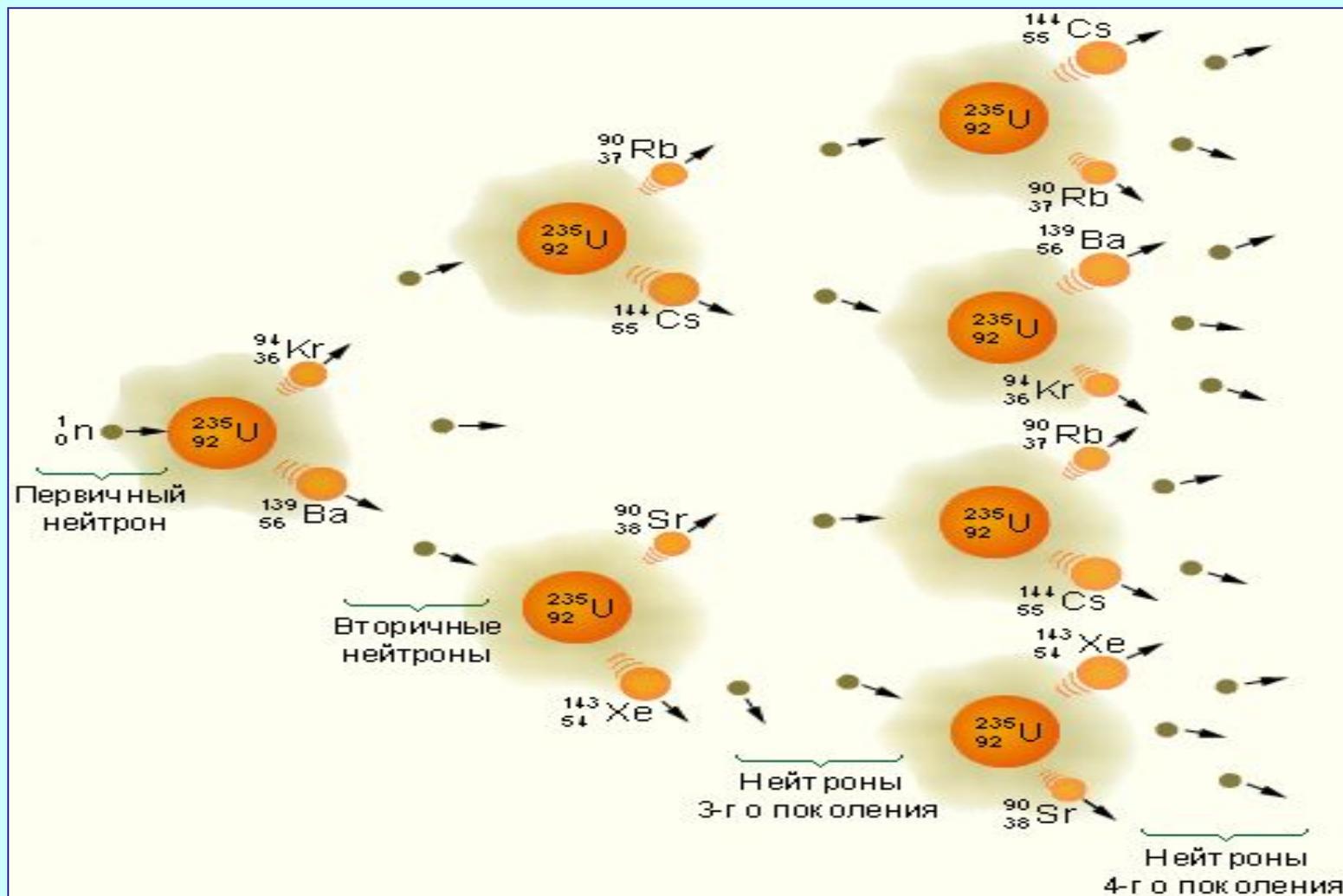
5. **В результате одного акта деления тяжелого ядра рождается несколько вторичных нейтронов.**

Один акт деления урана - 235 сопровождается выбросом 2 – 3 нейтронов (в среднем 2,5 нейтрона).

6. **Сильная радиоактивность** продуктов распада и большое количество вторичных нейтронов **представляют большую опасность.**

7. **Испускание нескольких нейтронов** при делении тяжелых ядер **делает возможность осуществления цепной ядерной реакции.**

# Схема развития цепной реакции



8. **Цепная реакция не возникнет**, если масса куска вещества будет меньше критической, иначе большинство вторичных нейтронов вылетает наружу, не вызвав деления ядер.

9. Для куска урана **критические размеры** составляют:

- масса ~ 50 кг;
- размер ~ 13 см.

Рассмотрим **неуправляемую цепную реакцию**, которая осуществляется **в атомных бомбах**.

Ядерный заряд такой бомбы представляет собой два или более кусков почти чистого урана-235 или плутония - 239.

Масса каждого куска меньше критической.

Чтобы вызвать ядерный взрыв, достаточно соединить части заряда в один кусок с массой, большей критической.

Это достигается обычным взрывом небольшой мощности взрывчаткой.

Для осуществления цепной реакции достаточно нейтронов, которые имеются в земной атмосфере.

Соединение кусков должно быть быстрым и плотным.

При взрыве успевает прореагировать только часть ядерного вещества.

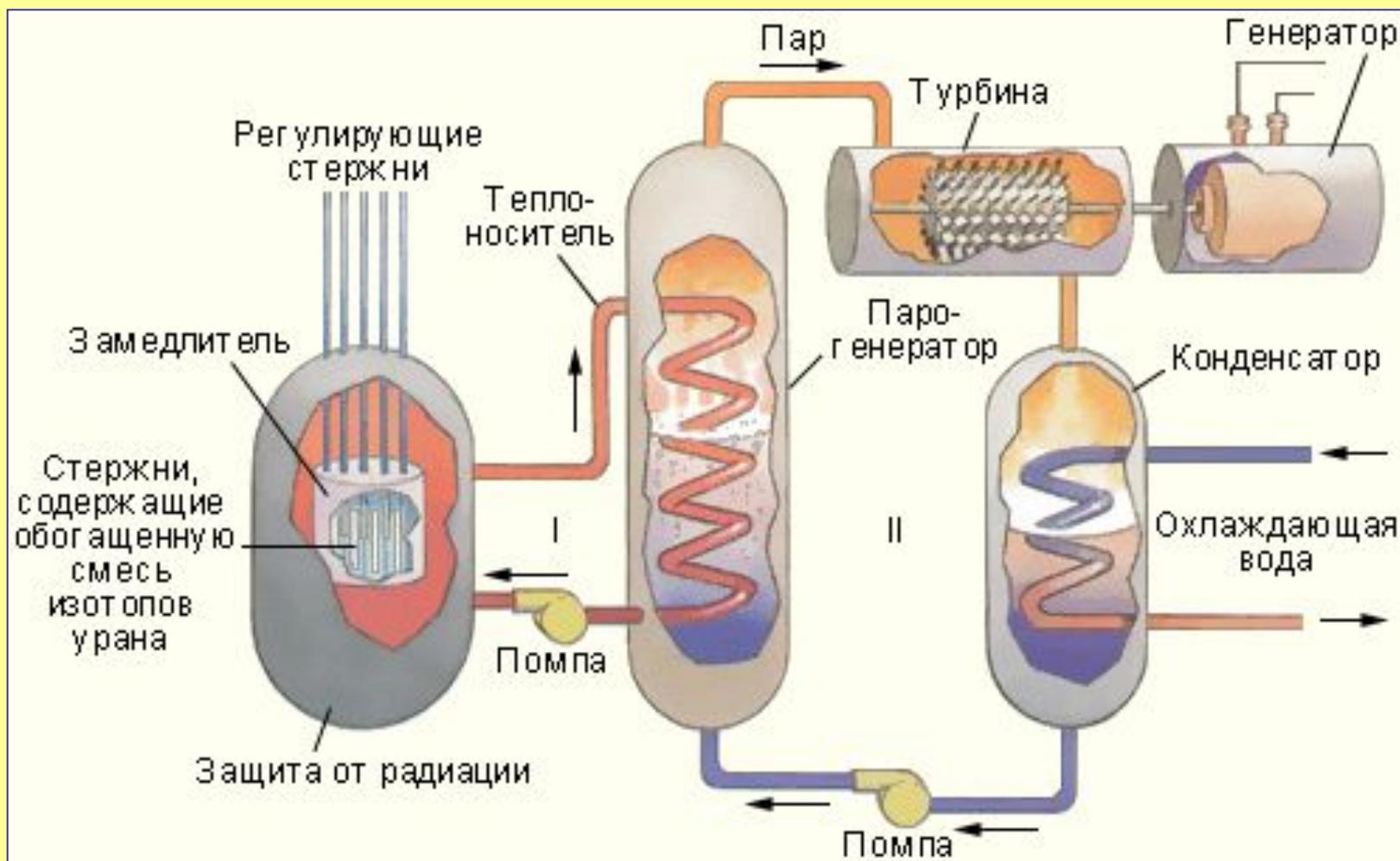
**Управляемая цепная реакция** деления тяжёлых ядер осуществляется **в ядерных реакторах** (атомных котлах).

**Ядерный реактор** - это устройство, предназначенное для превращения энергии атомного ядра в электрическую энергию.

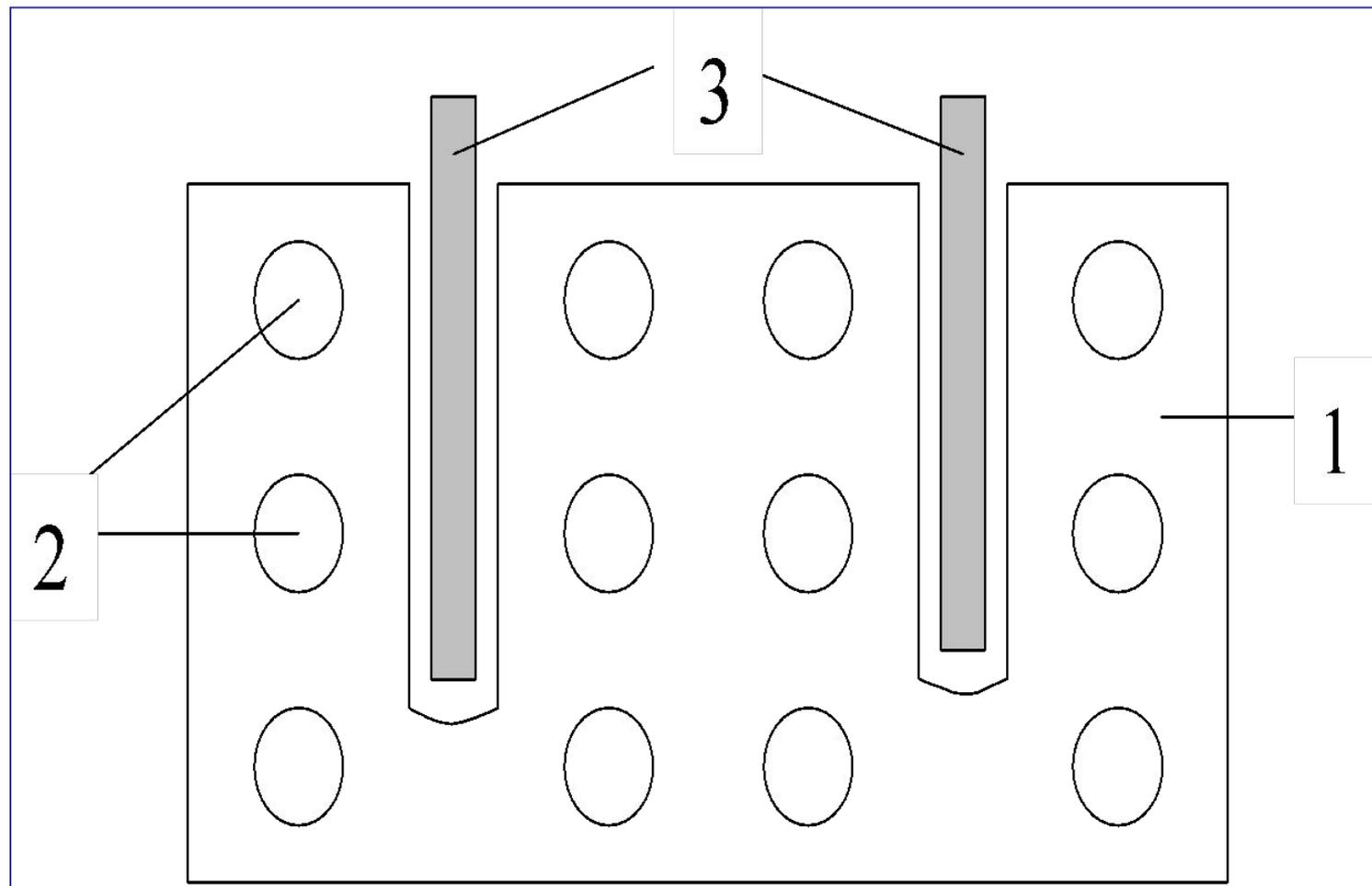
Существует несколько типов ядерных реакторов.

В качестве примера на рисунке показана схема устройства **ураново-графитового реактора на медленных нейтронах**.

# Схема устройства ядерного реактора



## Блок - схема ураново-графитового реактора



**В качестве делящегося (рабочего) вещества** в реакторах служит либо природный, либо **обогащенный изотоп урана.**

Его помещают в виде блоков (2) в вещество, которое предназначено для замедления нейтронов (1).

**В качестве замедлителей** используют **тяжелую воду, обычную воду, графит.**

Энергия, выделяемая за счет  $\alpha$ -распада этих атомов, нагревает воду. Получающийся водяной пар устремляется в паровую турбину.

Режим работы атомного реактора определяется **коэффициентом размножения нейтронов.**

**Коэффициент размножения нейтронов** показывает, сколько новых нейтронов в среднем освобождается при одном делении ядра.

Специальные **графитовые стержни поглощают быстрые нейтроны.**

При пуске реактора коэффициент размножения  $K$  должен быть больше 1.

Когда скорость реакции достигает желаемой величины, должно установиться состояние, соответствующее стационарному процессу:  $K = 1$ .

Если  $K < 1$ , то прерывается больше цепочек деления, чем возникает новых, и процесс останавливается.

Регулирование коэффициента размножения осуществляется с помощью стержней (З), которые содержат **вещество, поглощающее нейтроны** (кадмий, бор, гафний).

При подъёме стержней из реактора величина  $K$  увеличивается, при опускании – уменьшается.

Для защиты от радиоактивных излучений и нейтронов все устройство окружается толстым слоем бетона.

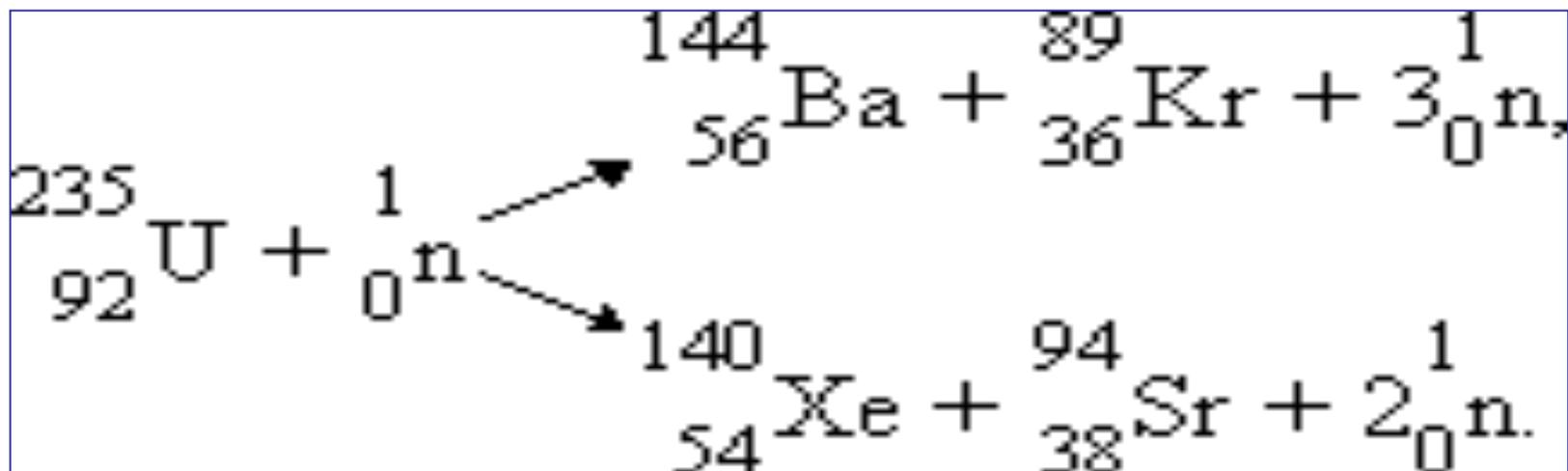
При делении 1 урана выделяется примерно столько же тепла, что соответствует сгоранию 3000 тонн каменного угля.

Эта энергия преобразовывается в пар и используется для получения электрической энергии.

Первая атомная электростанция была построена в 1954 году в Советском Союзе.

Основной интерес для ядерной энергетики представляет реакция деления ядра урана – 235, в результате которой при делении одного ядра выделяется энергия, равная примерно **200 МэВ**.

Две типичные реакции деления этого ядра имеют вид:



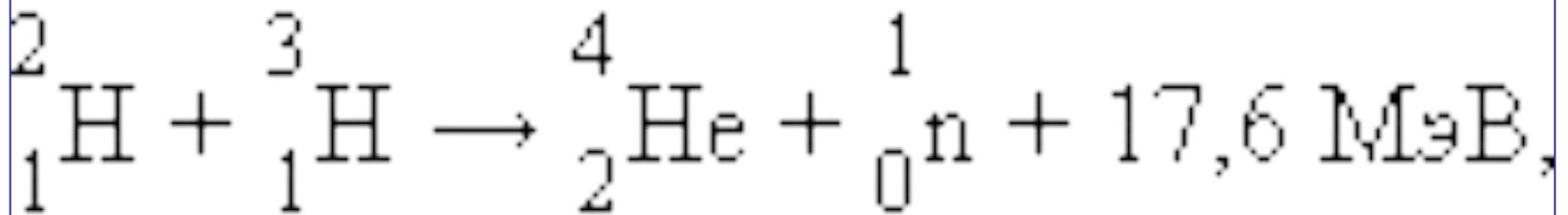
## Термоядерная реакция синтеза

- реакция слияния легких ядер в более тяжелые, которая сопровождается выделением огромного количества энергии.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях, в расчете на один нуклон, в несколько раз превышает удельную энергию, выделяющуюся в цепных реакциях деления тяжёлых ядер.

Например, превращение 1г водорода в гелий приводит к освобождению в 8 раз большей энергии, чем деление 1г урана.

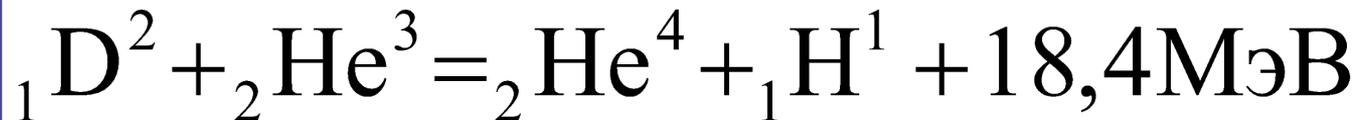
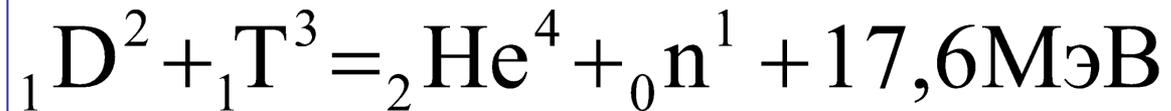
Реакция слияния ядер дейтерия и трития является одной из наиболее перспективных термоядерных реакций.



Синтез легких ядер может стать возможным при условии очень большой скорости столкновения ядер.

**Синтез легких ядер осуществляется только при очень высоких температурах ( $10^8 \text{ К}$ ), поэтому реакции ядерного синтеза получили название термоядерных реакций.**

## Примеры некоторых термоядерных реакций



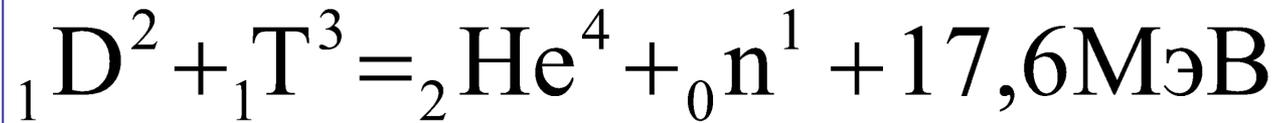
При осуществлении термоядерной реакции особенно большие трудности возникают при получении и поддержании высоких температур.

**При температурах  $10^8$  К ядерная смесь представляет собой плазму.**

Удержание плазмы в заданном объёме и предотвращение охлаждения плазмы – сами по себе еще не решенные задачи.

Применение термоядерных реакций с целью получения взрывов **водородной бомбы (неуправляемые термоядерные реакции)** представляет значительно меньшие трудности.

Заряд водородной бомбы образуют вещества дейтерий и тритий, реакция которых происходит по схеме:



Запалом в такой бомбе служит обычная атомная бомба, при взрыве которой в течение очень малой доли секунды температура достигает  $10^7 - 10^8 \text{ K}$ .

За это время смесь, пригодная для термоядерной реакции, нагревается до такой температуры, что ядерный синтез сопровождается взрывом.

Разрушительная сила водородной бомбы во много раз больше, чем атомной.

Термоядерные реакции протекают в грандиозных масштабах во Вселенной.

На Солнце предположительно осуществляется протонно – протонный цикл, протекающий в 3 стадии:

