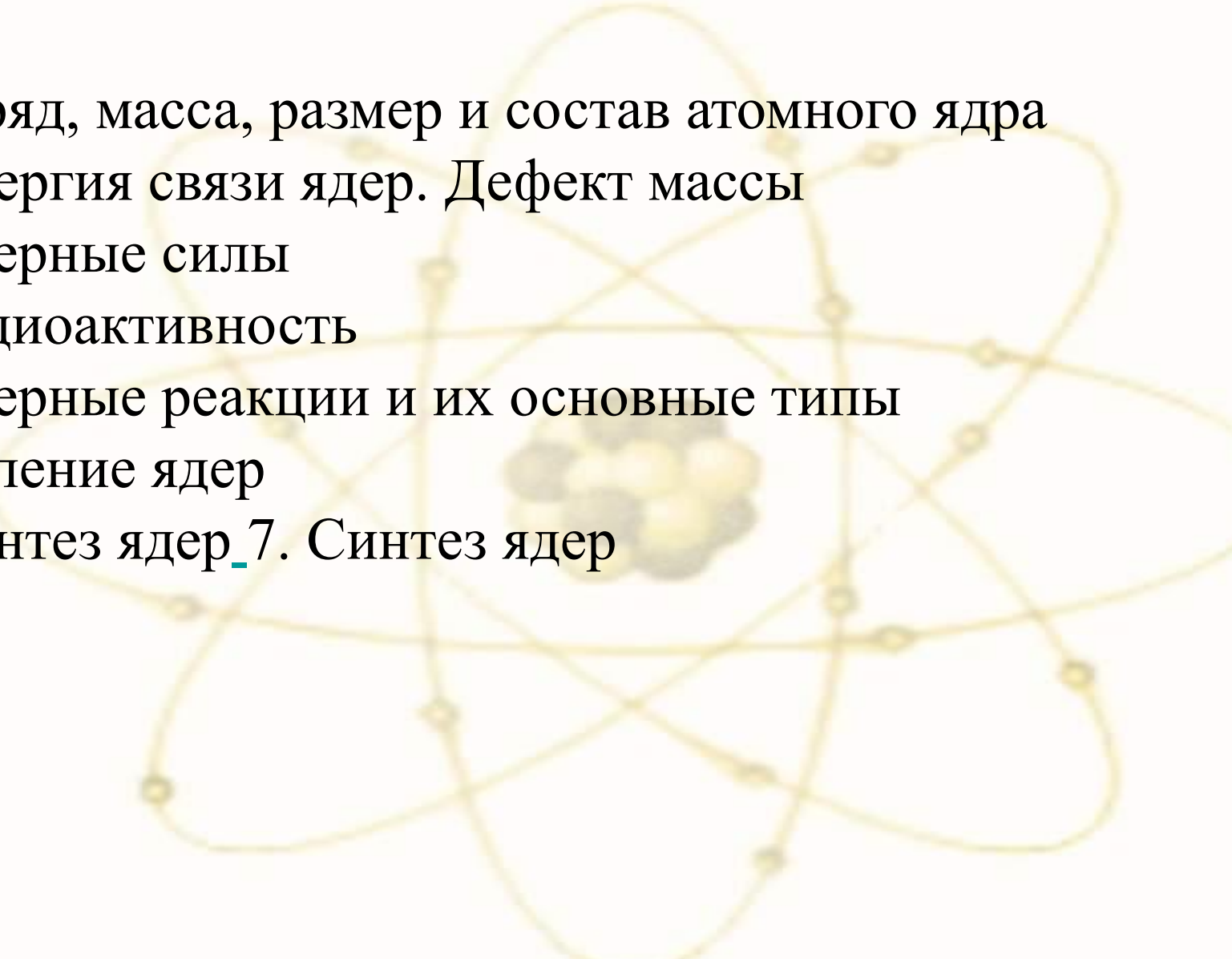
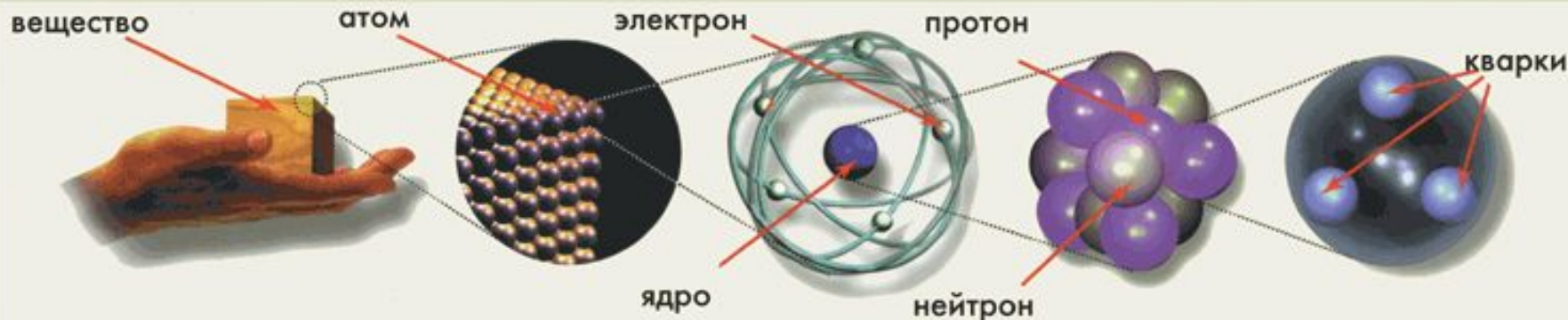


# ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

1. Заряд, масса, размер и состав атомного ядра
  2. Энергия связи ядер. Дефект массы
  3. Ядерные силы
  4. Радиоактивность
  5. Ядерные реакции и их основные типы
  6. Деление ядер
  7. Синтез ядер
- 

# Заряд, масса, размер, и состав атомного ядра







## Фундаментальные фермионы

### ЛЕПТОНЫ



Электрический заряд	-1		0	
	Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.	<b>Электрон</b> переносит электрический ток $M = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$		<b>Электронное нейтрино</b> играет фундаментальную роль при горении солнца, каждую секунду сквозь вас пролетают миллиарды этих частиц.
Эти частицы существовали в первый момент после «Большого взрыва». Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц.	<b>Мюон</b> аналог электрона, время жизни – 2 микросекунды $M = 106 \text{ МэВ}/c^2$		<b>Мюонное нейтрино</b> образуется при рождении и распаде мюона. $M < 0.2 \text{ МэВ}/c^2$	
	<b>Тау</b> аналог электрона, время жизни – $3 \cdot 10^{-13}$ $M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$		<b>Тау нейтрино</b> образуется при рождении и распаде тау лептона, открыто в 1975 г. $M < 20 \text{ МэВ}/c^2$	

### КВАРКИ

Электрический заряд	+2/3		-1/3	
	Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.	<b>u-кварк</b> входит в состав протонов и нейтронов. $M = 3 \text{ МэВ}/c^2$		<b>d-кварк</b> входит в состав протонов и нейтронов. $M = 6 \text{ МэВ}/c^2$
Эти частицы существовали в первый момент после «Большого взрыва». Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц.	<b>s-кварк (сcharованный)</b> открыт в 1974 г. $M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$		<b>c-кварк (странный)</b> открыт в 1964 г. $M = 100 \text{ МэВ}/c^2$	
	<b>t-кварк</b> открыт в 1995 г. $M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$		<b>b-кварк (прелестный)</b> открыт в 1977 г. $M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$	

## Кванты фундаментальных полей

<b>Глюоны</b> кванты сильного взаимодействия		<b>Фотоны</b> кванты электромагнитного поля	
Взаимодействуют:	кварки и глюоны	Все заряженные частицы	
Объекты:	протон, нейтрон, атомные ядра, пи-мезон и др. мезоны	атомы, молекулы	
Процессы:	деление и синтез атомных ядер	электричество, магнетизм, распространение света, радиоволны	

<b>Промежуточные векторные бозоны</b> кванты слабого взаимодействия		<b>Гравитоны</b> кванты гравитации	
Взаимодействуют:	кварки, лептоны, промежуточные бозоны	все частицы	
Объекты:		солнечная система, галактики, черные дыры	
Процессы:	бета-распад ядер, распад нейтрона и мюона	притяжение тел	

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

Протон имеет:

**положительный заряд**  $e^+ = 1,06 \cdot 10^{-19}$  Кл

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



$^{16}_8\text{O}$



$^{17}_8\text{O}$



$^{18}_8\text{O}$

**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.

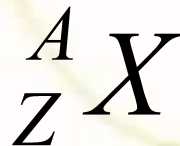
В настоящее время известны ядра с

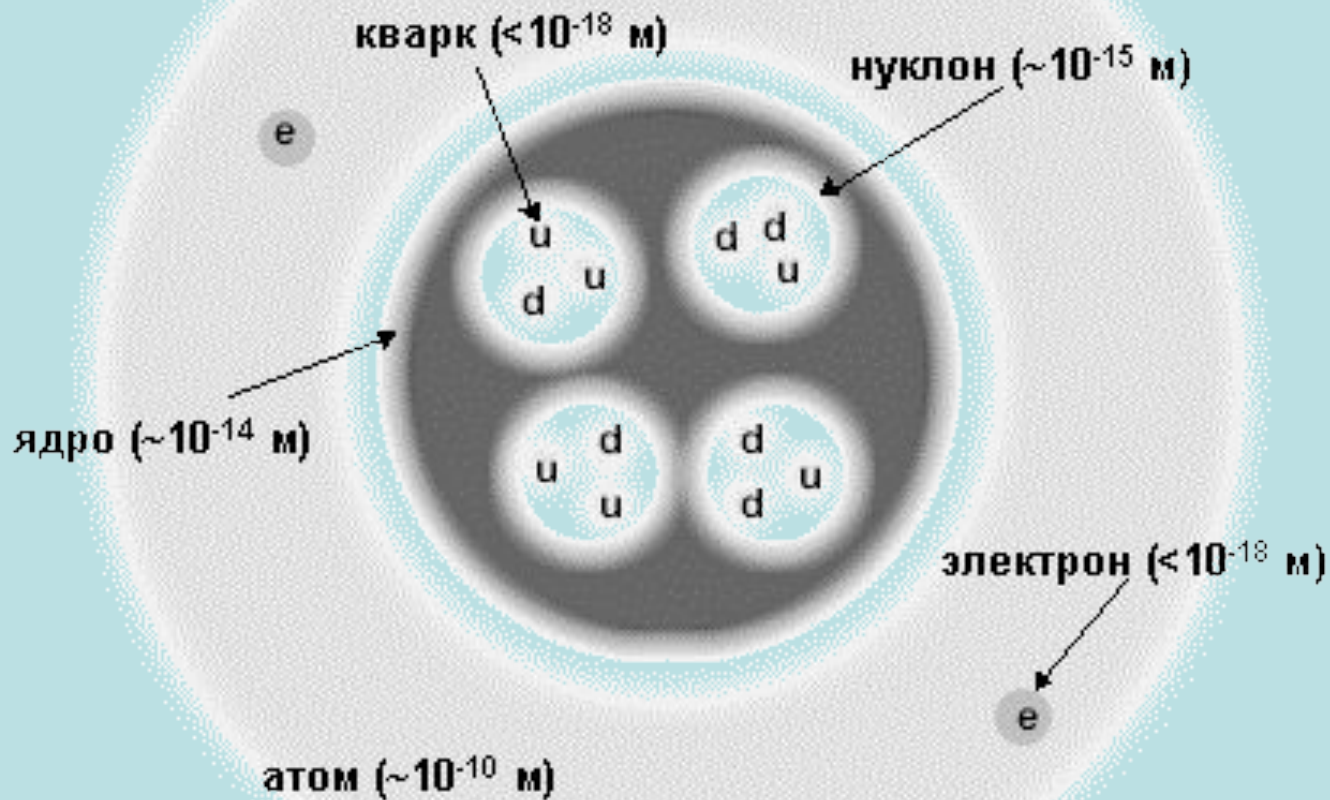
$$Z = 1 \quad \text{до} \quad Z = 107 - 118$$

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

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

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





$$R = R_0 A_0^{1/3} = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

*Плотность ядерного вещества составляет*  
 $10^{17} \text{ кг/м}^3$

Протоны и нейтроны являются фермионами, так как имеют спин  $\hbar/2$ .

Ядро атома имеет собственный момент импульса – **спин ядра**, равный

$$L_{\text{яд}} = \hbar \sqrt{I(I + 1)}$$

$I$  – внутреннее (полное) спиновое квантовое число.

Единицей измерения магнитных моментов ядер служит ядерный магнетон  $\mu_{\text{яд}}$ :

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

**Ядерный магнетон в  $m_p/m_e = 1836,5$  раз меньше магнетона Бора, откуда следует, что магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.**

$$P_{m_{\text{яд}}} = \gamma_{\text{яд}} L_{\text{яд}}$$

$\gamma_{\text{яд}}$  – ядерное гиромагнитное отношение.

$$\mu_n \approx -1,913 \mu_{\text{яд}}$$

$$\mu_p \approx 2,793 \mu_{\text{яд}}$$

# Квадрупольный электрический момент ядра $Q$

$Q$  определяется только формой ядра.

Так, для **эллипсоида вращения**:

$$Q = \frac{2}{5} Z_e (b^2 - a^2)$$





## 2. 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:

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

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

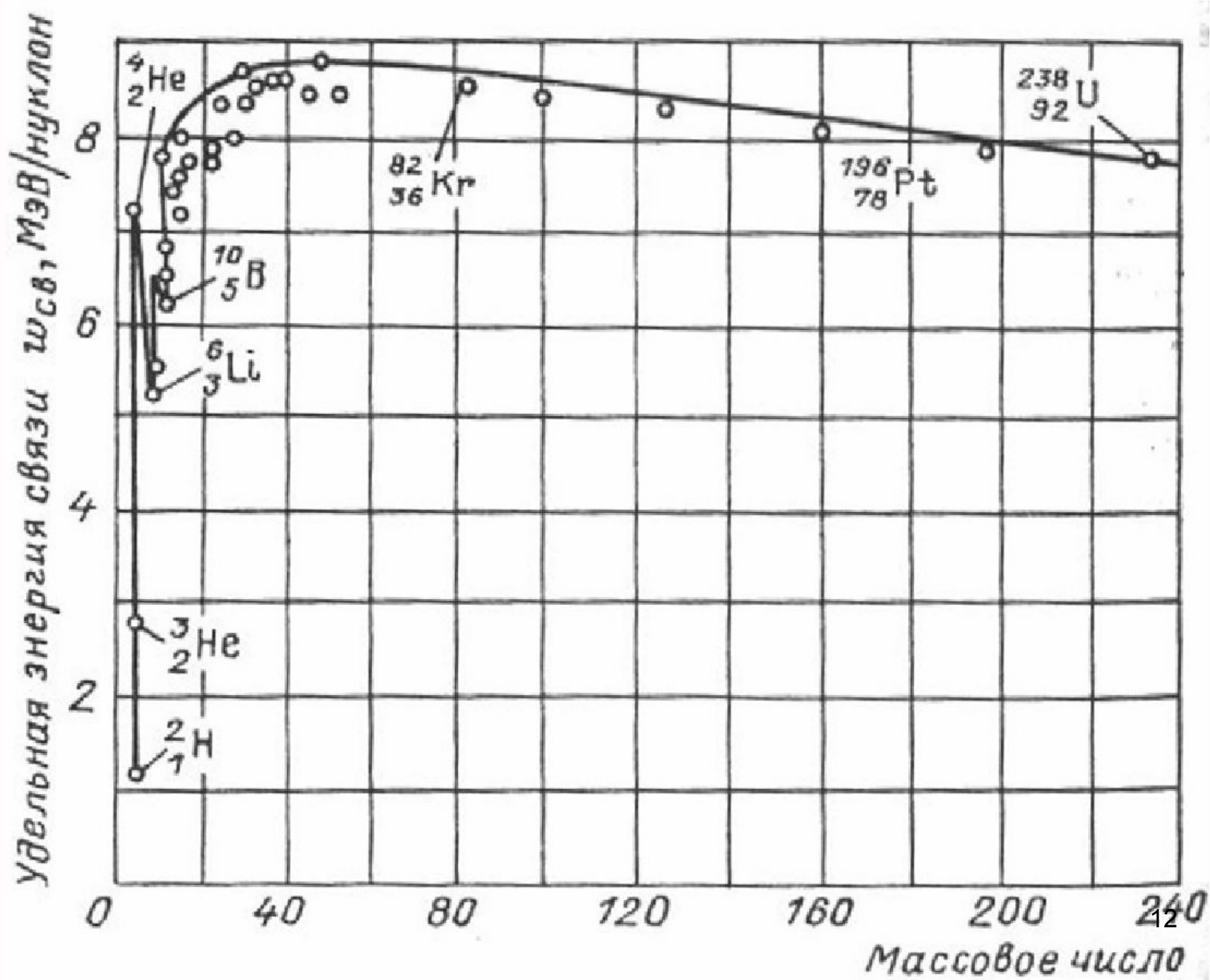
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}}$$

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

$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}$$



Величина  $\omega_{\text{св}}$  составляет в среднем 8 МэВ/нуклон



**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.**

### 3. Ядерные силы

#### Свойства ядерных сил:

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

## 4. Радиоактивность

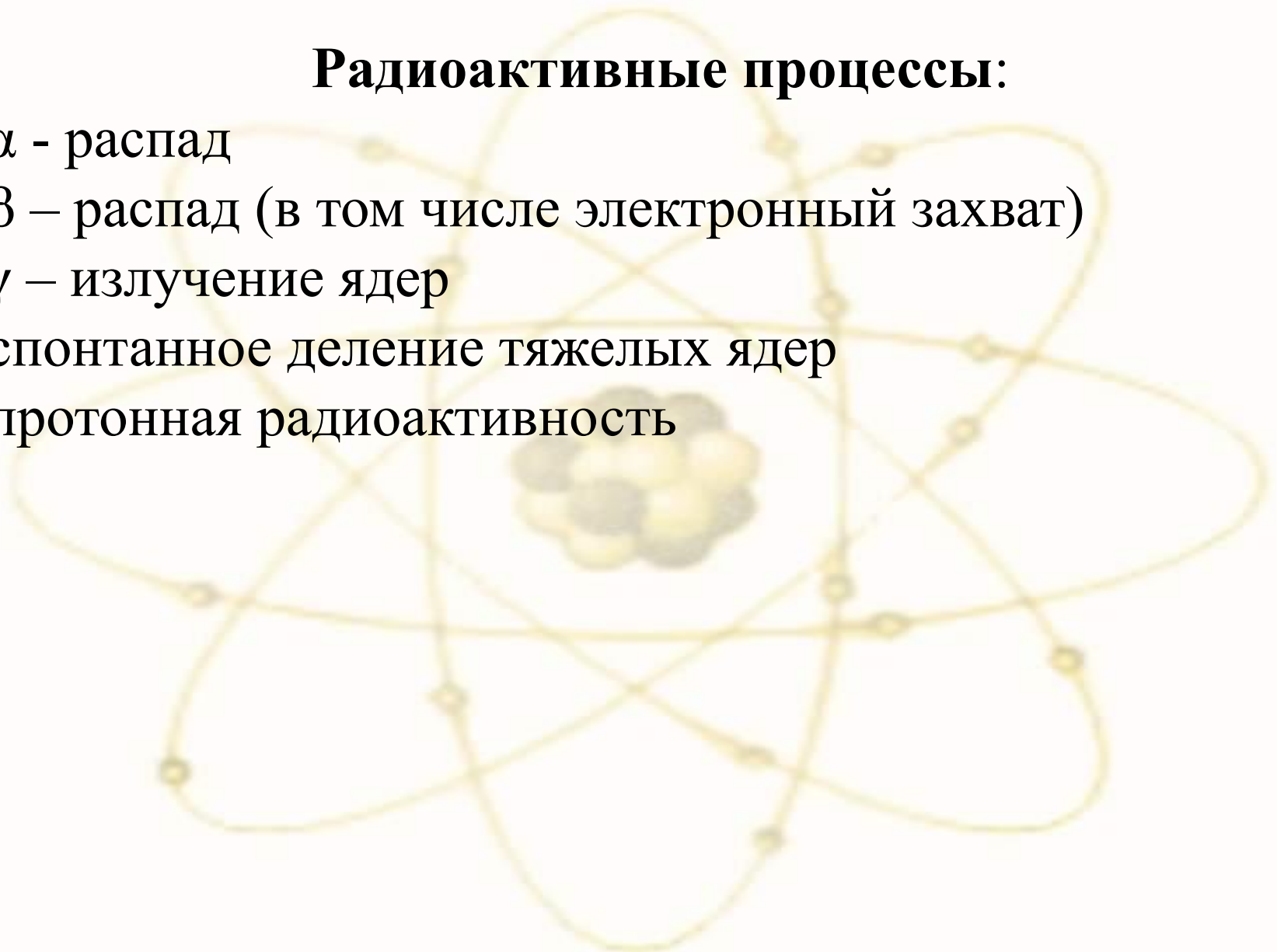
**Радиоактивностью** называется превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

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

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

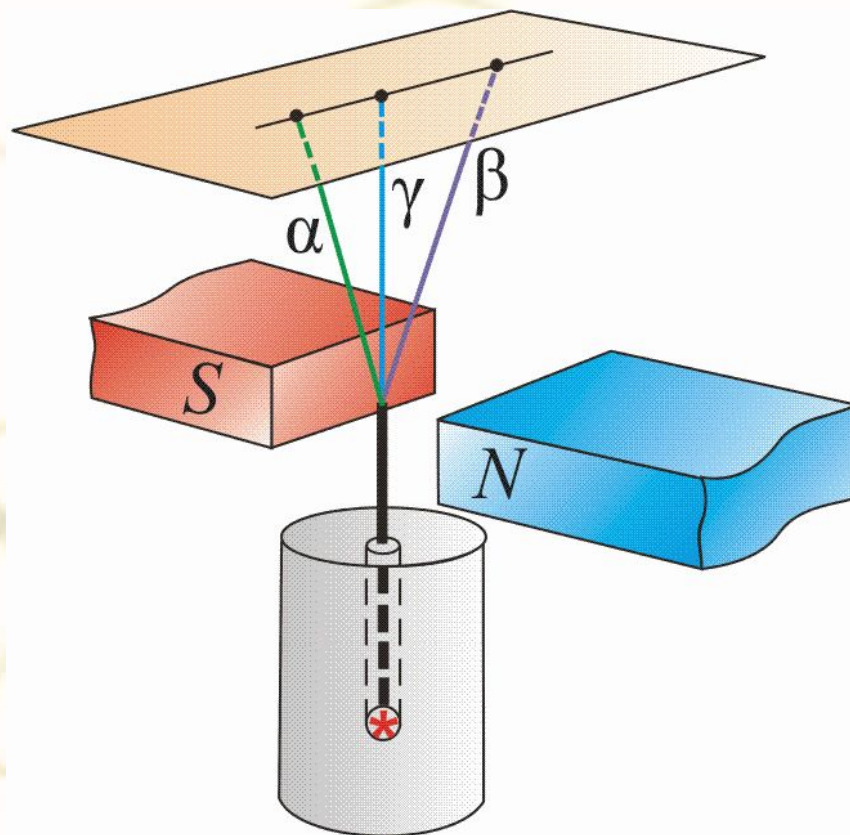
## Радиоактивные процессы:

- $\alpha$  - распад
- $\beta$  – распад (в том числе электронный захват)
- $\gamma$  – излучение ядер
- спонтанное деление тяжелых ядер
- протонная радиоактивность





## Поведение разных типов радиоактивного излучения в магнитном поле:

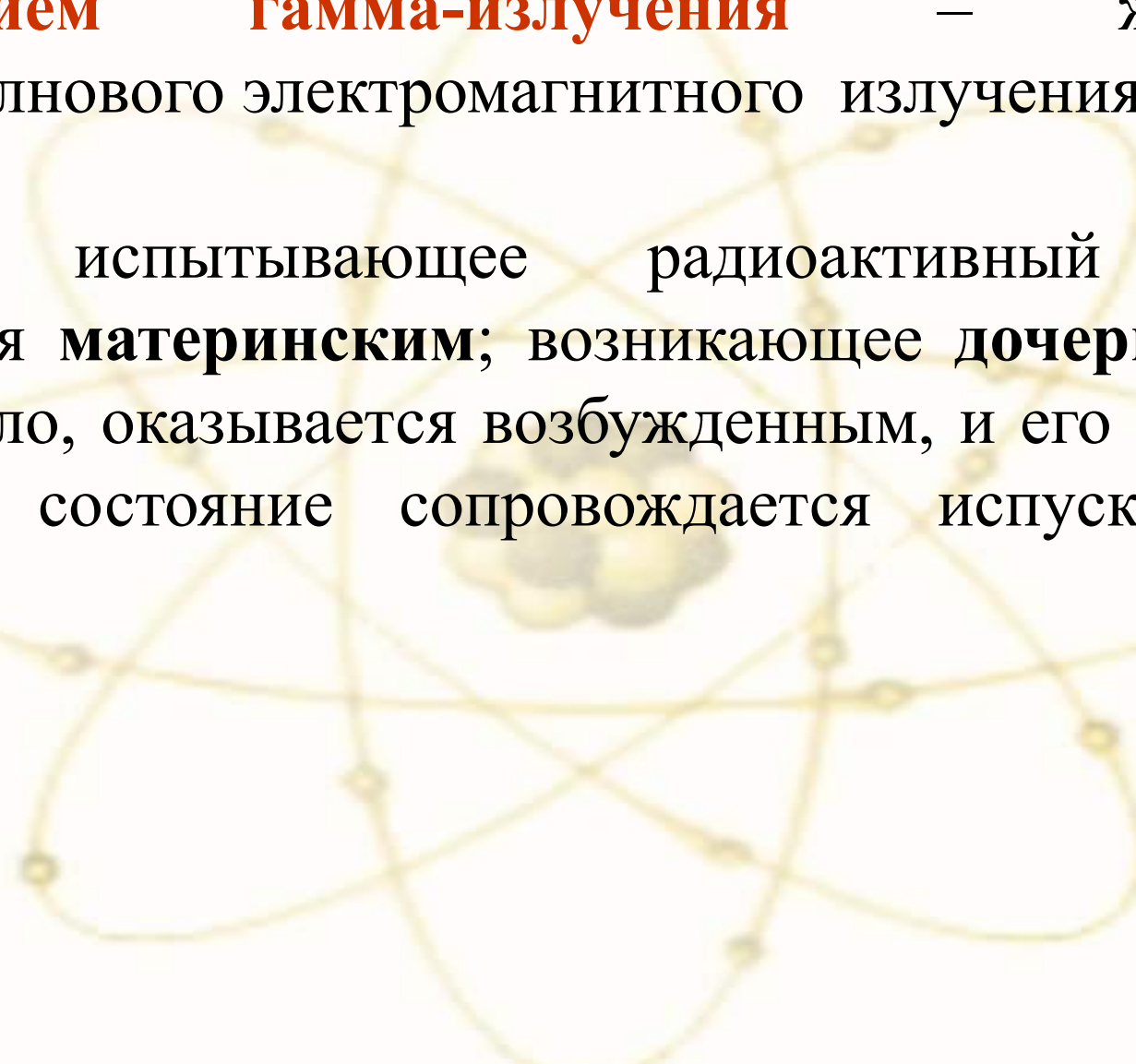


- Альфа-лучи отклоняются в ту же сторону, что и поток положительно заряженных частиц
- Бета-лучи – в противоположную сторону (как поток отрицательных частиц)
- Гамма-лучи никак не реагируют на действие магнитного поля

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

**Все типы радиоактивности сопровождаются**  
**испусканием гамма-излучения** — жесткого,  
коротковолнового электромагнитного излучения.

Ядро, испытывающее радиоактивный распад,  
называется **материнским**; возникающее **дочернее ядро**,  
как правило, оказывается возбужденным, и его переход в  
основное состояние сопровождается **испусканием  $\gamma$ -**  
**фотона**.



## 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

Величина  $1/\lambda = \tau$  - средней продолжительности жизни (среднее время жизни  $\tau$ ) радиоактивного изотопа.

Средняя продолжительность  $\tau$  жизни всех первоначально существовавших ядер

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Суммарная продолжительность жизни  $dN$  ядер равна  $t|dN| = t\lambda N dt$ .

Характеристикой устойчивости ядер относительно распада служит **период полураспада  $T_{1/2}$** . - **время**, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества уменьшается наполовину.

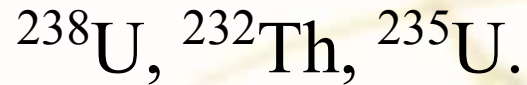
**Связь  $\lambda$  и  $T_{1/2}$ :**

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

Бывает, что дочерние ядра также радиоактивные и распадаются со скоростью, характеризуемой постоянной распада  $\lambda'$ .

Новый продукт распада также радиоактивный и т.д...

- образуется **радиоактивный ряд (семейство)**:



**Активность радиоактивного препарата  $A$  ( $A=\lambda N$ )**

- число распадов в единицу времени.

Единица измерения активности - **беккерель (Бк)** =  
**распад в секунду.**

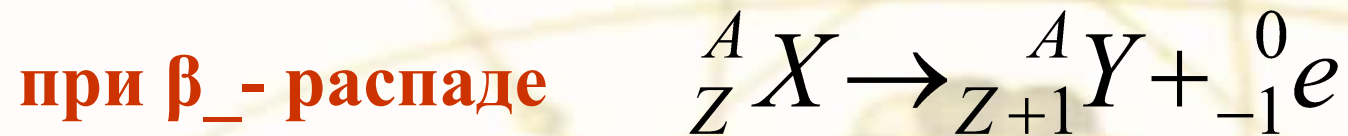
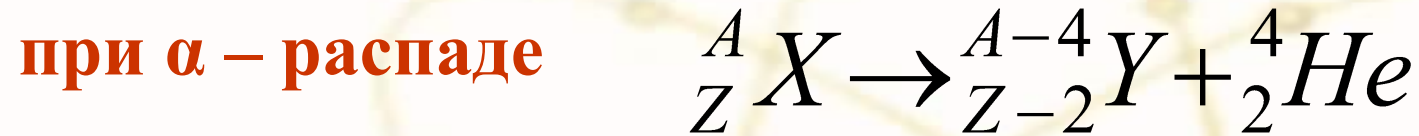
**Закон сохранения электрического заряда при радиоактивном распаде ядер:**

$$Z_{\text{яд}}e = \sum_i Z_i e$$

где  $Z_{\text{яд}}e$  – заряд материнского ядра,  
 $Z_i e$  – заряды ядер и частиц, возникших в результате радиоактивного распада.



# Правила смещения (правила Фаянса и Содди) при радиоактивных $\alpha$ - и $\beta_-$ – распадах:



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

$Y$  – символ дочернего ядра,

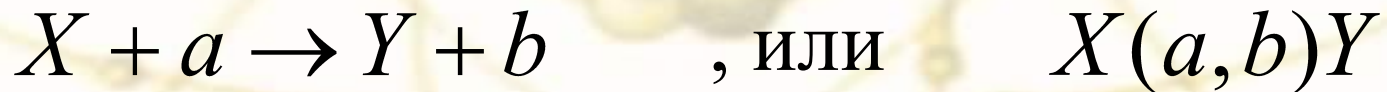
${}^4_2 \text{He}$  – ядро гелия,

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

## 5. 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:

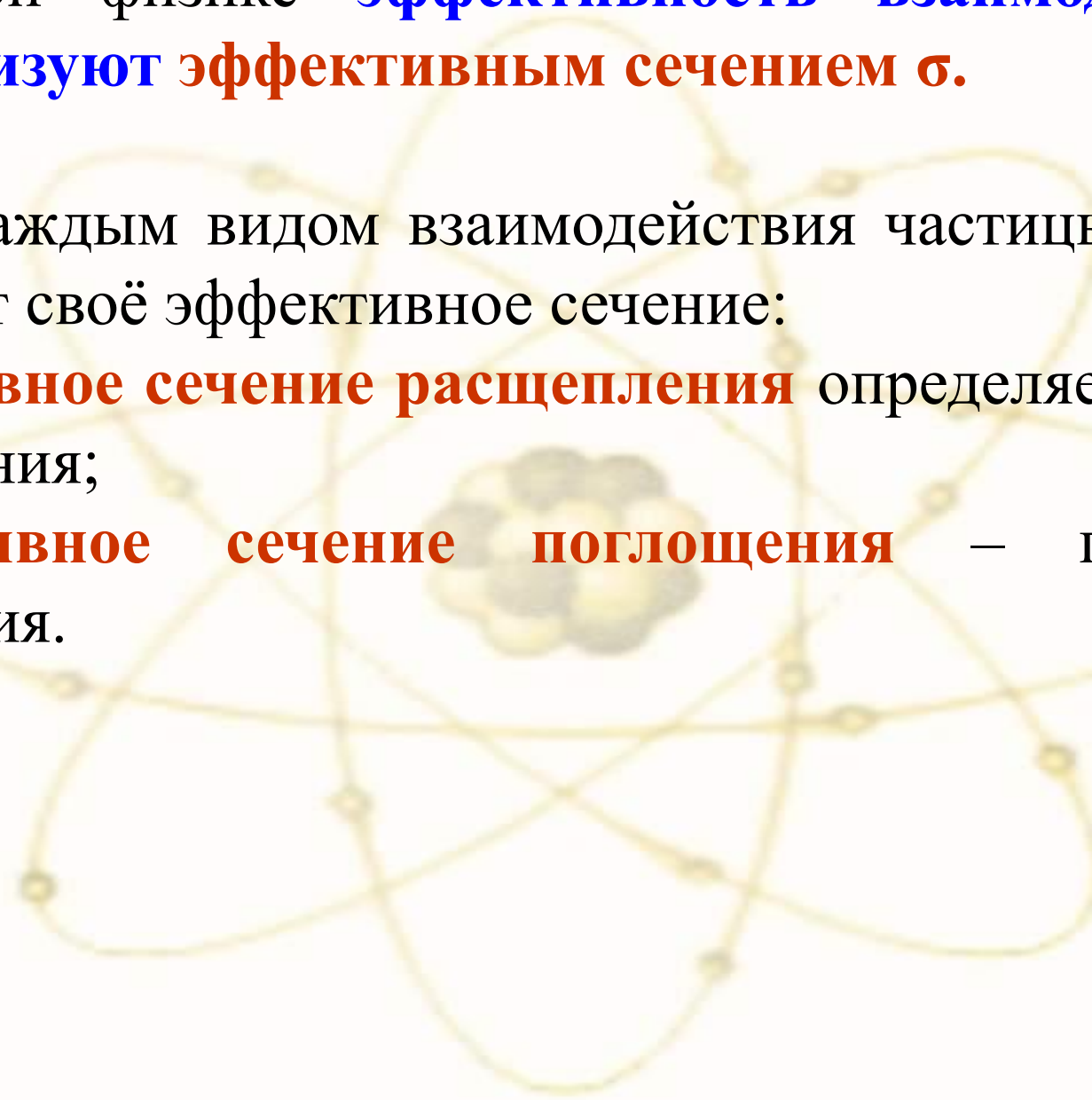


где  $X$  и  $Y$  – исходные и конечные ядра,  
 $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В ядерной физике **эффективность взаимодействия** характеризуют **эффективным сечением  $\sigma$** .

С каждым видом взаимодействия частицы с ядром связывают своё эффективное сечение:

- **эффективное сечение расщепления** определяет процесс расщепления;
- **эффективное сечение поглощения** — процессы поглощения.



## Эффективное сечение ядерной реакции:

$$\sigma = dN / (nNdx)$$

где  $N$  – число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объёма  $n$  - ядер;

$dN$  – число этих частиц, вступающих в реакцию в слое толщиной  $dx$ .

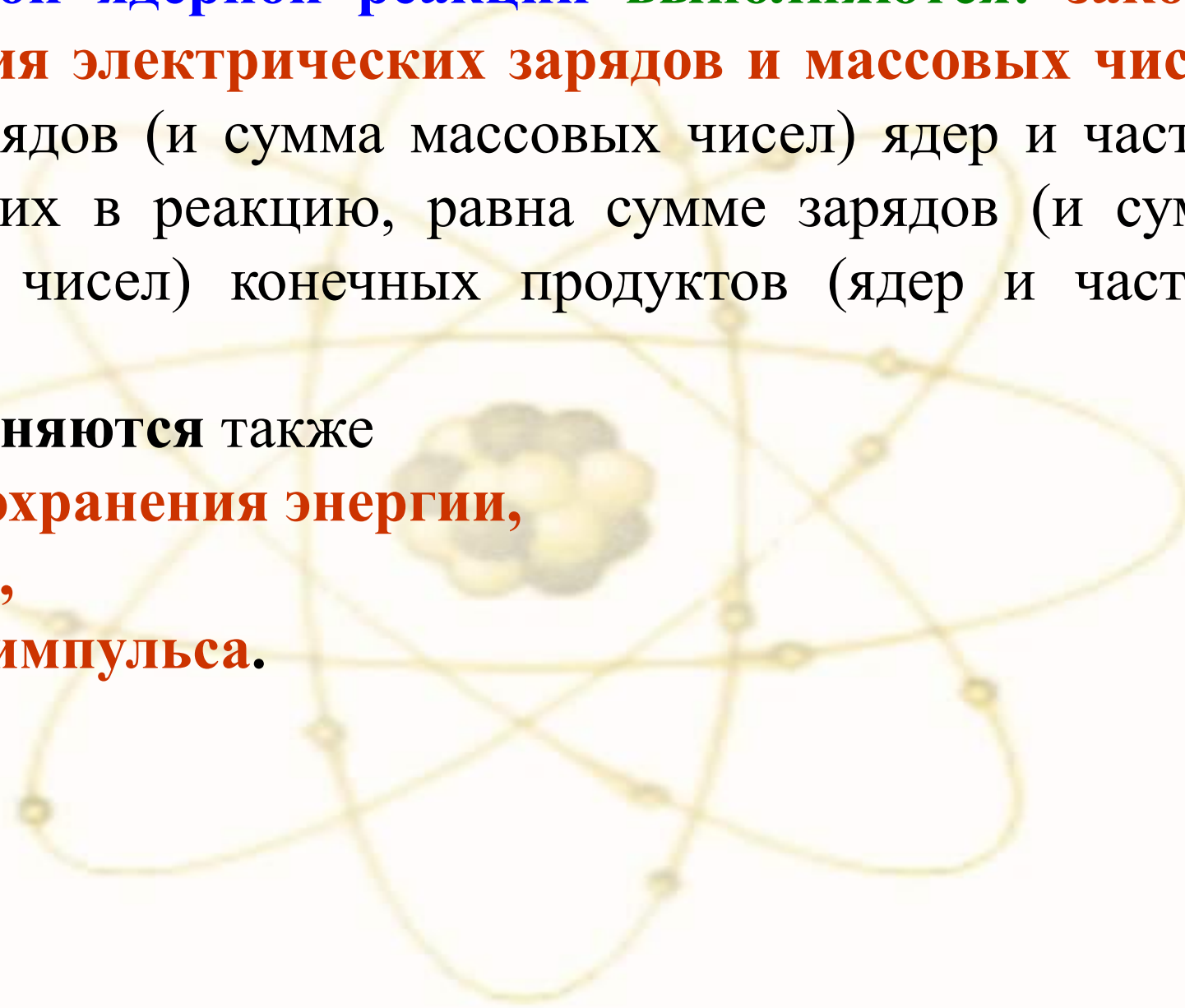
Эффективное сечение  $\sigma$  имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдёт реакция.

Единицы измерения эффективного сечения ядерных процессов – барн ( $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$ ).

**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).**



Важнейшую роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло **предположение М. Бора** (1936 г.) о том, что **ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:**



Первая стадия – это **захват ядром X частицы a**, приблизившийся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно  $2 \cdot 10^{-15}$  м), и **образование промежуточного ядра C**, называемого **составным (или компаунд – ядром)**.



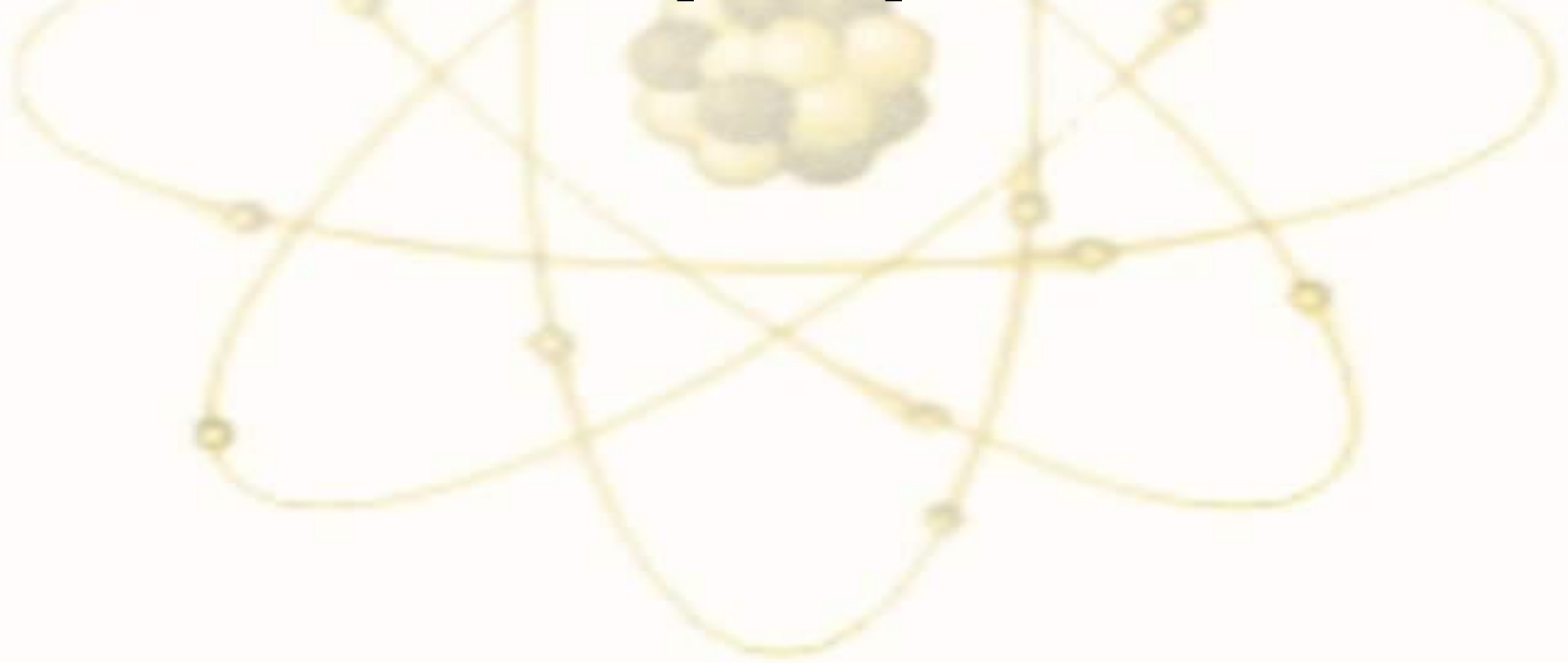
Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в **возбуждённом состоянии**.

**При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов** (или их комбинация, например дейтрон или  $\alpha$ -частица) **может получить энергию, достаточную для вылета из ядра.**

**В результате наступает вторая стадия ядерной реакции – распад составного ядра на ядро  $Y$  и частицу  $b$ .**



**Так как время жизни составного ядра  $10^{-16} - 10^{-12}$  с, а характерное ядерное время – время, необходимое для пролета частицей расстояния порядка величины равной диаметру ядра ( $d \approx 10^{-15}$  м) -  $\tau \approx 10^{-22}$  с, то характер распада составного ядра (испускаемые им частицы  $b$ ) – вторая стадия ядерной реакции – не зависит от способа образования составного ядра – первой стадии.**



Если испущенная частица тождественна с захваченной ( $b \equiv a$ ), то возникает **рассеяние частицы**:

**упругое** – при  $E_b = E_a$ ;

**неупругое** – при  $E_b \neq E_a$ .

Если же испущенная частица не тождественна с захваченной ( $b \neq a$ ), то имеем сходство с ядерной реакцией в прямом смысле слова.

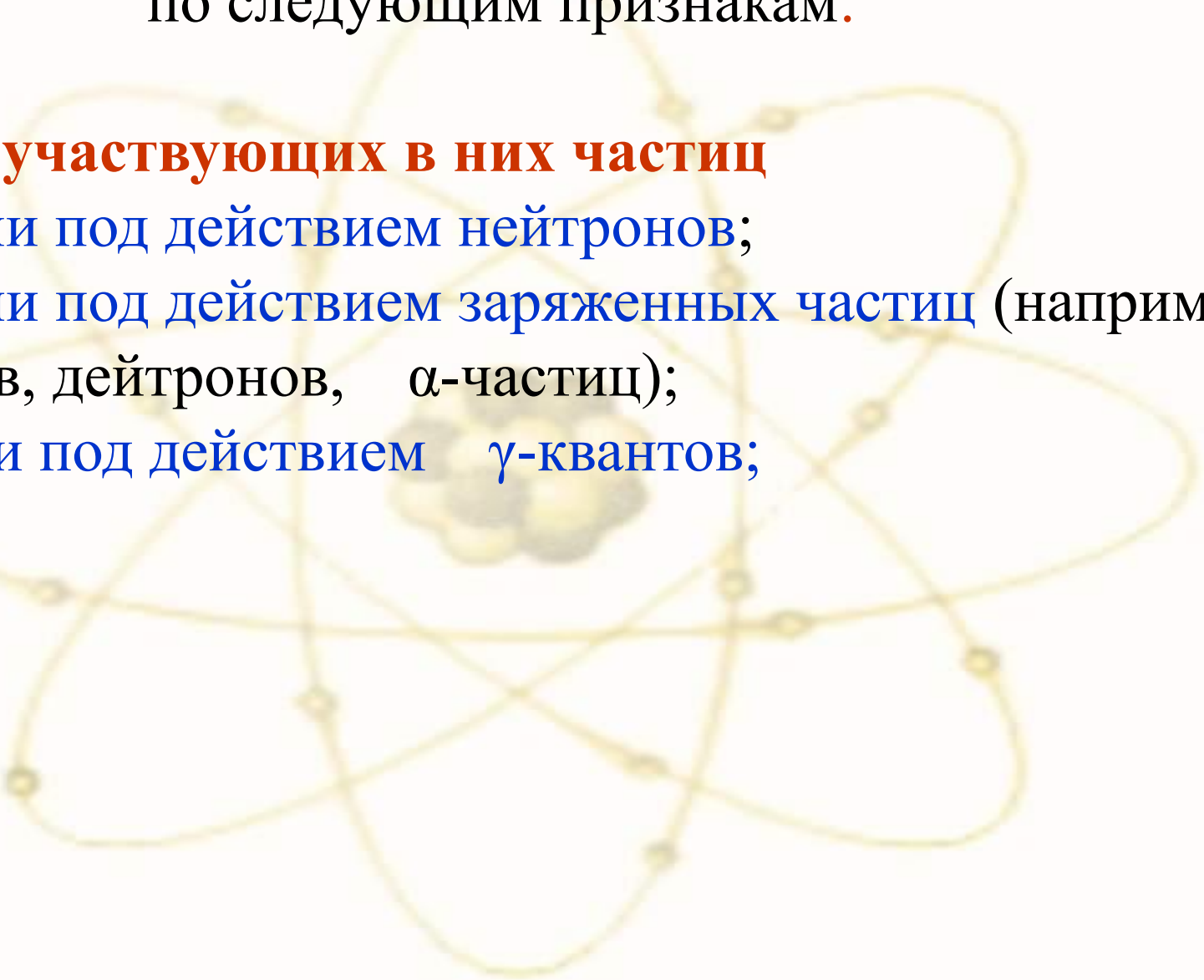
**Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями** (например, реакция вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

# Ядерные реакции классифицируются

по следующим признакам:

## 1. по роду участвующих в них частиц

- реакции под действием нейтронов;
- реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц);
- реакции под действием  $\gamma$ -квантов;



## 2. по энергии вызывающих их частиц

- **реакции при малых энергиях** (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов;
- **реакции при средних энергиях** (порядка до нескольких МэВ), происходящие с участием  $\gamma$ -квантов и заряженных частиц (протон,  $\alpha$ -частицы);
- **реакции происходящие при высоких энергиях** (сотни и тысячи МэВ), приводящие к образованию отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющих большое значение для их изучения;

**3. по роду участвующих в них ядер** – реакции на лёгких ядрах ( $A < 50$ ); реакции на средних ядрах ( $50 < A < 100$ ); реакции на тяжёлых ядрах ( $A > 100$ );

**4. по характеру происходящих ядерных превращений** –

- реакции с испусканием нейтронов;
- реакции с испусканием заряженных частиц;
- реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переход в основное состояние, испуская один или несколько  $\gamma$ -квантов).

## 6. Деление ядер

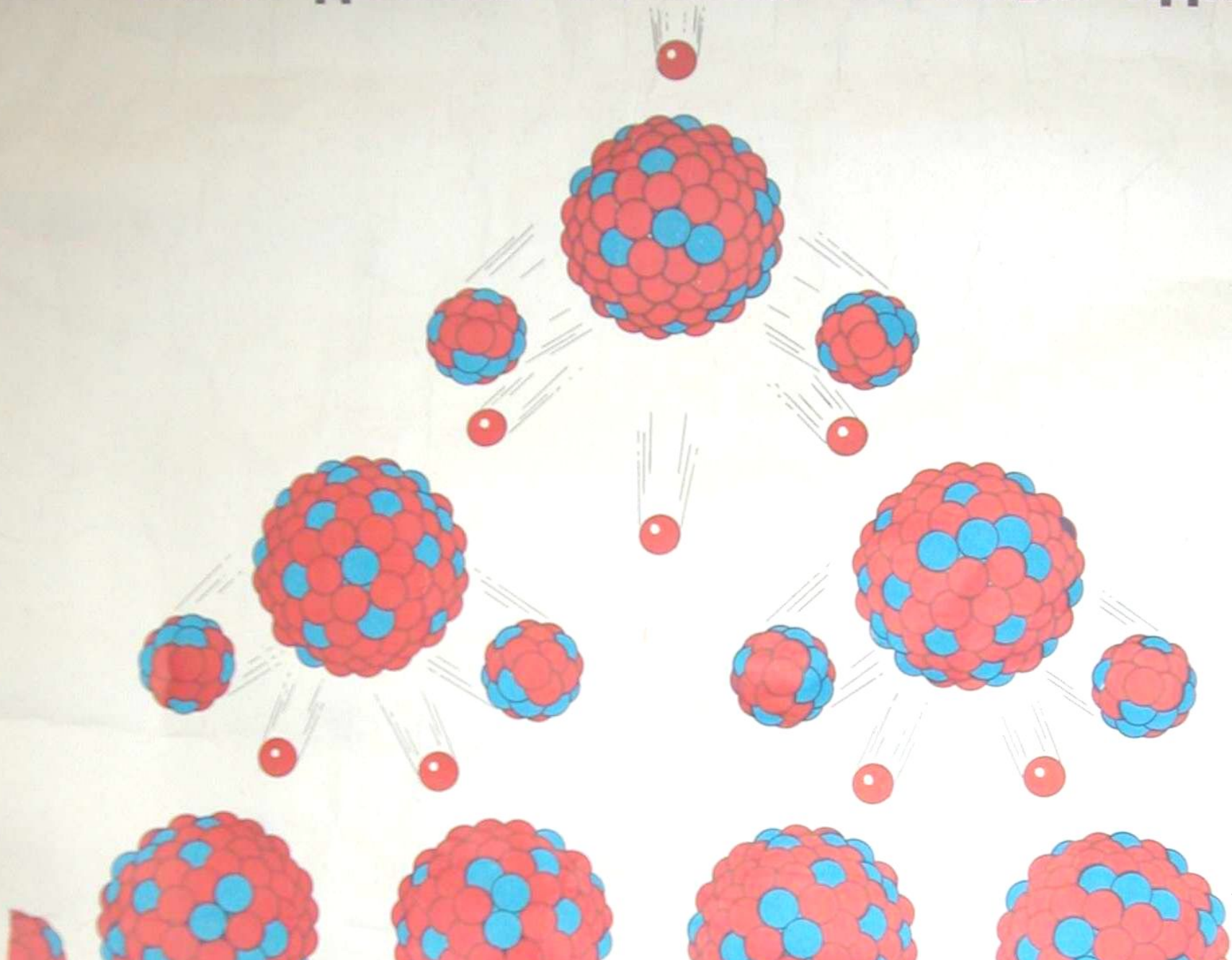
Задача была решена немецкими физиками Л. Мейтнер и О. Фришем, показавшими, что **при поглощении нейтронов ураном происходит деление ядра на два осколка.**

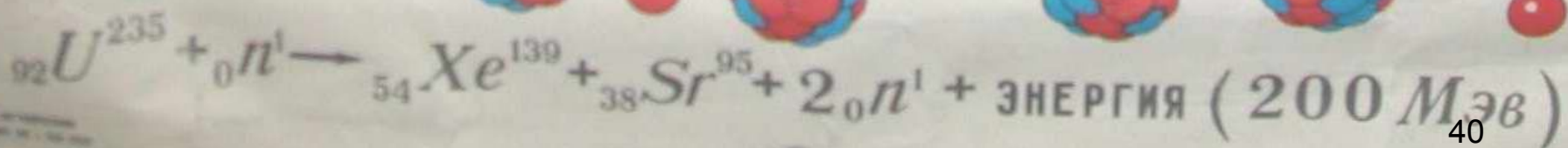
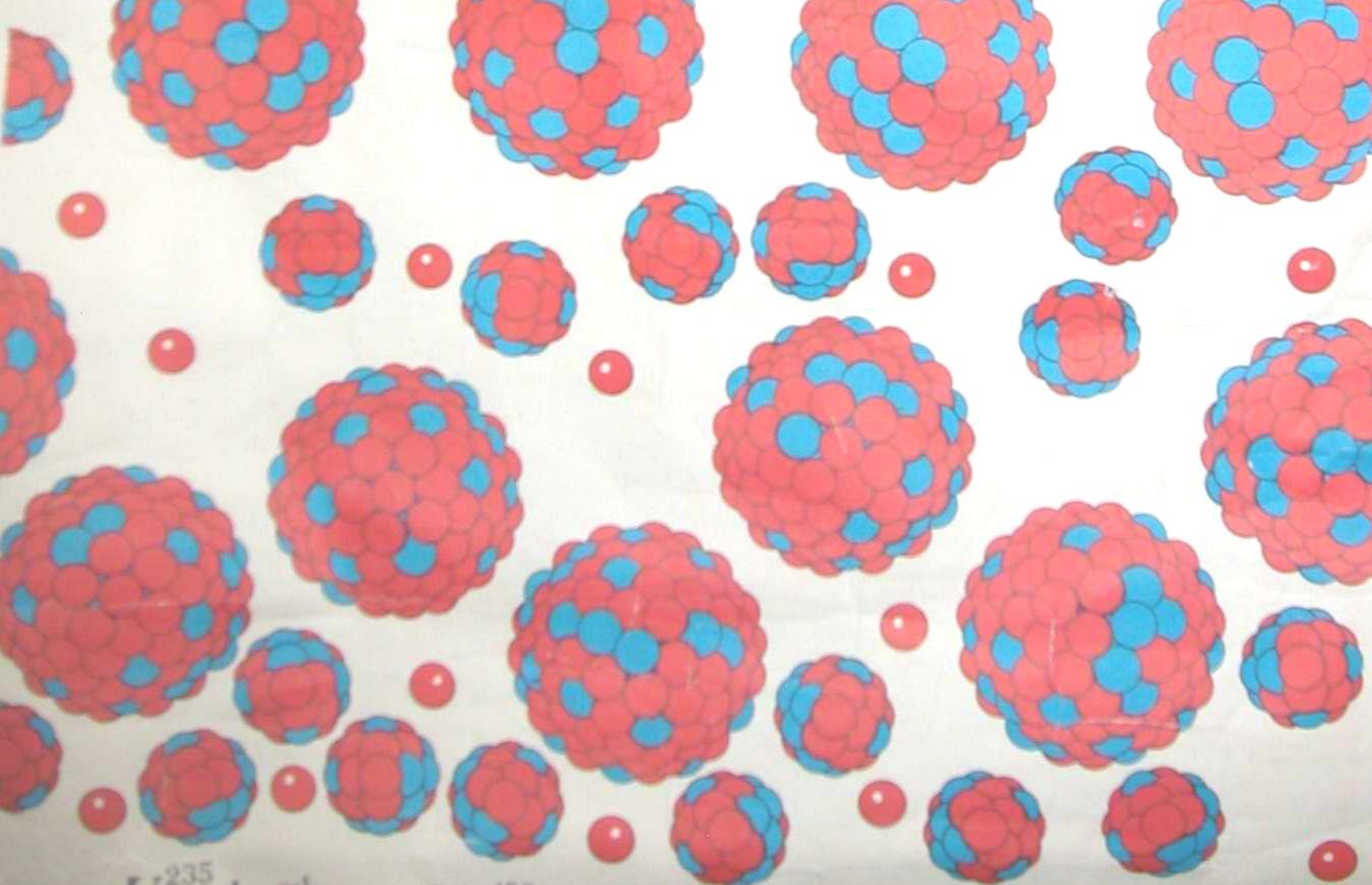


где  $k > 1$ .

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

# СХЕМА ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АТОМНЫХ ЯДЕР







# Используется цепная реакция деления в двух направлениях:

- управляемая ядерная реакция деления — создание атомных реакторов;
- неуправляемая ядерная реакция деления — создание ядерного оружия.

В 1942 г. под руководством Э. Ферми в США был построен первый ядерный реактор.

В СССР первый реактор был запущен в 1946 г. под руководством И. Курчатова.

В 1954 г. в СССР была построена первая атомная электростанция.

**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).

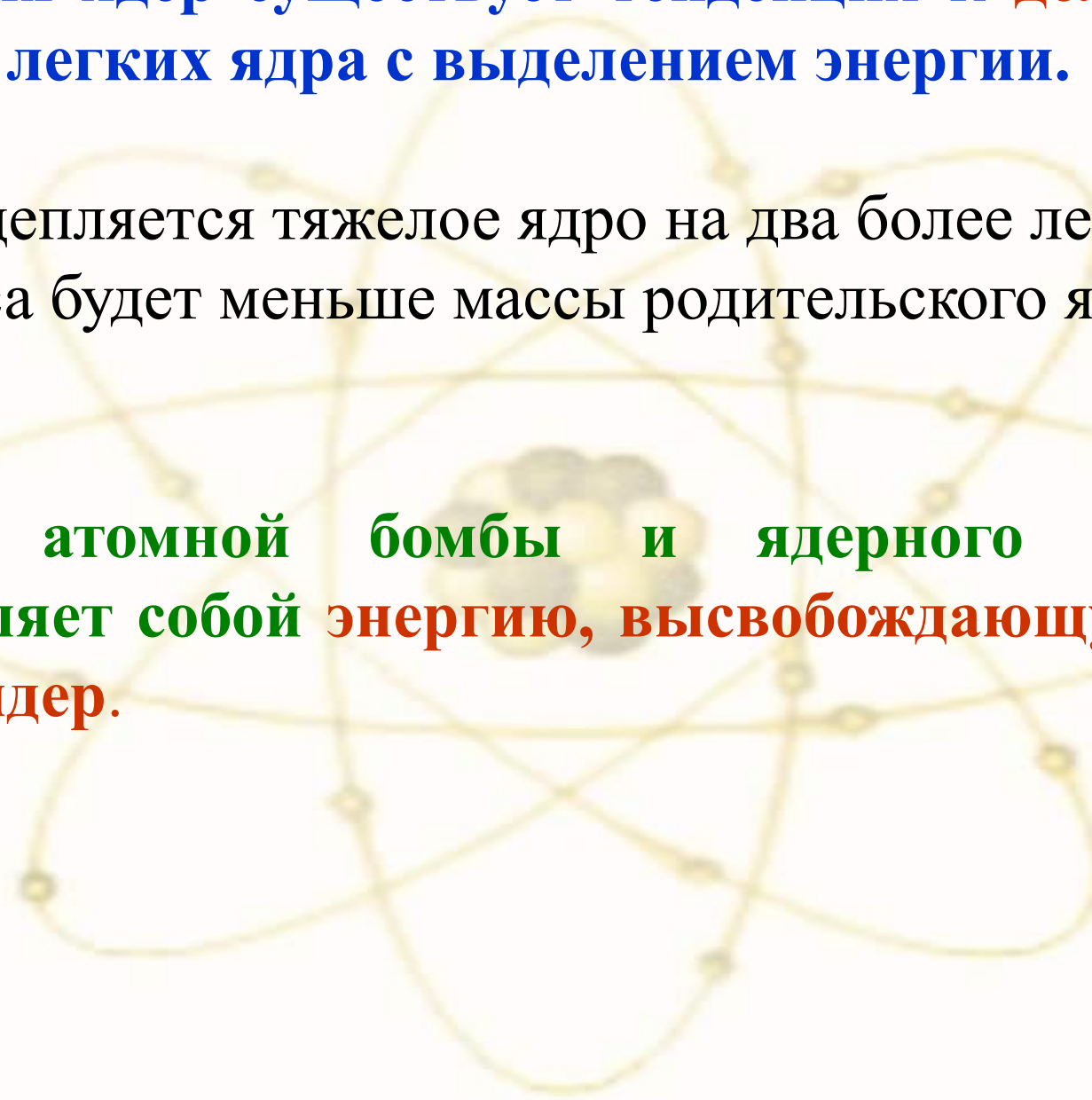
**При соединении легкие ядра сольются с выделением энергии  $\Delta Mc^2$ . Этот процесс называется синтезом ядер. Разность масс может превышать 0,5%.**

Энергия **водородной бомбы** — это энергия, выделяющаяся при **ядерном синтезе**.

**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.**



Оценка энергии, освобождающейся при делении, может быть получена из **формулы Вайцзеккера**:

$$E_{\text{св}} = \alpha_1 A - \alpha_2 A^{2/3} - \alpha_3 Z^2 / A^{1/3} - \alpha_4 (A/2 - Z)^2 / A + \alpha_5 A^{-3/4}$$

При делении ядра на два осколка изменяются  
**поверхностная энергия**  $E_{\text{п}} = \alpha_2 A^{2/3}$  и  
**кулоновская энергия**  $E_{\text{к}} = \alpha_3 Z^2 / A^{1/3}$ ,

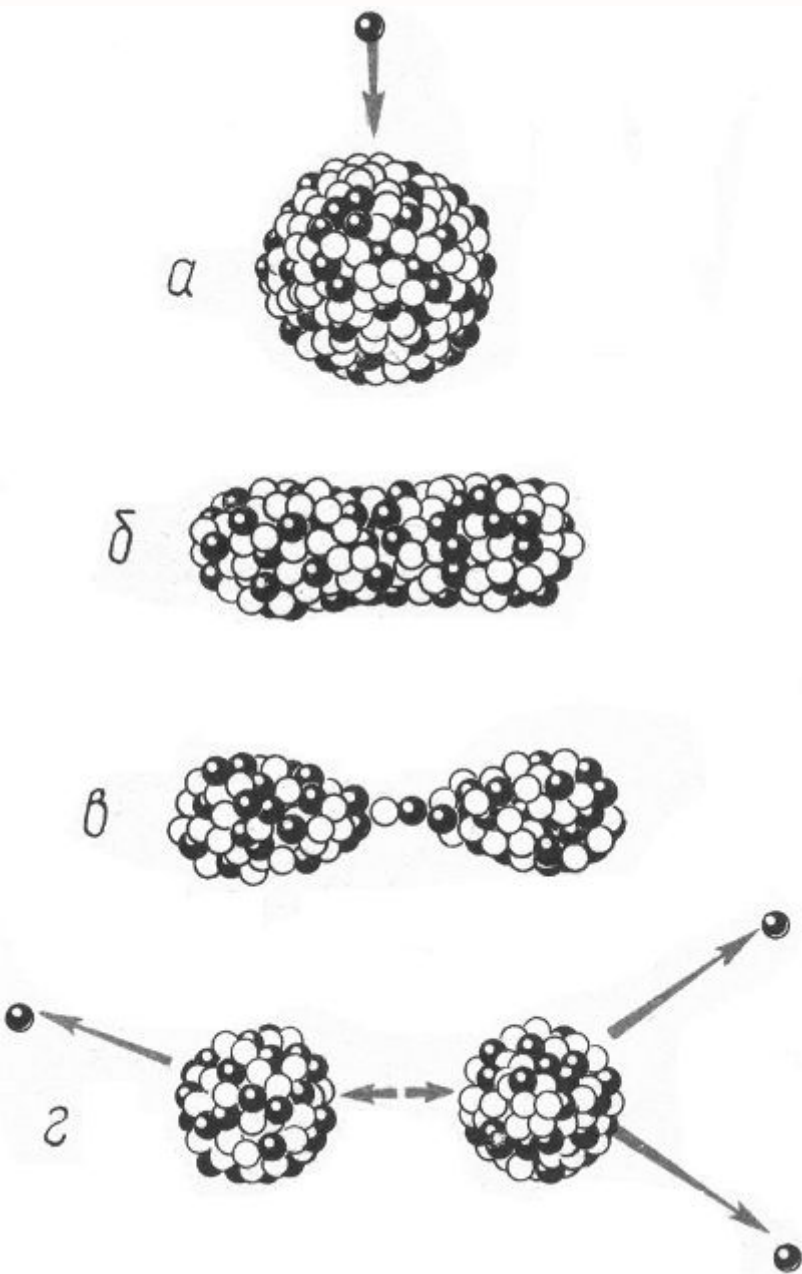
причем поверхностная энергия увеличивается, а кулоновская энергия уменьшается.

**Деление возможно в том случае, когда энергия, высвобождающаяся при делении  $E > 0$ .**

$$E \approx \alpha_3 \frac{Z_1^2}{A_1^{1/3}} 0,37 - \alpha_2 A_1^{2/3} 0,26 > 0$$

Здесь  $A_1 = A/2$ ,  $Z_1 = Z/2$ . Отсюда получим, что **деление энергетически выгодно, когда  $Z^2/A > 17$ .**

**Величина  $Z^2/A$  называется параметром делимости**



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

Высота барьера деления  $H$  тем больше, чем меньше отношение кулоновской и поверхностной энергии  $E_K / E_{\text{П}}$  в начальном ядре.

Это отношение, в свою очередь, увеличивается с увеличением параметра делимости  $Z^2/A$ .

Чем тяжелее ядро, тем меньше высота барьера деления  $H$ , так как параметр делимости увеличивается с ростом массового числа.

Более тяжелым ядрам, как правило, нужно сообщить меньшую энергию, чтобы вызвать деление.

Из формулы Вайцзеккера следует, что высота барьера деления обращается в нуль при

$$Z^2 / A > 49$$

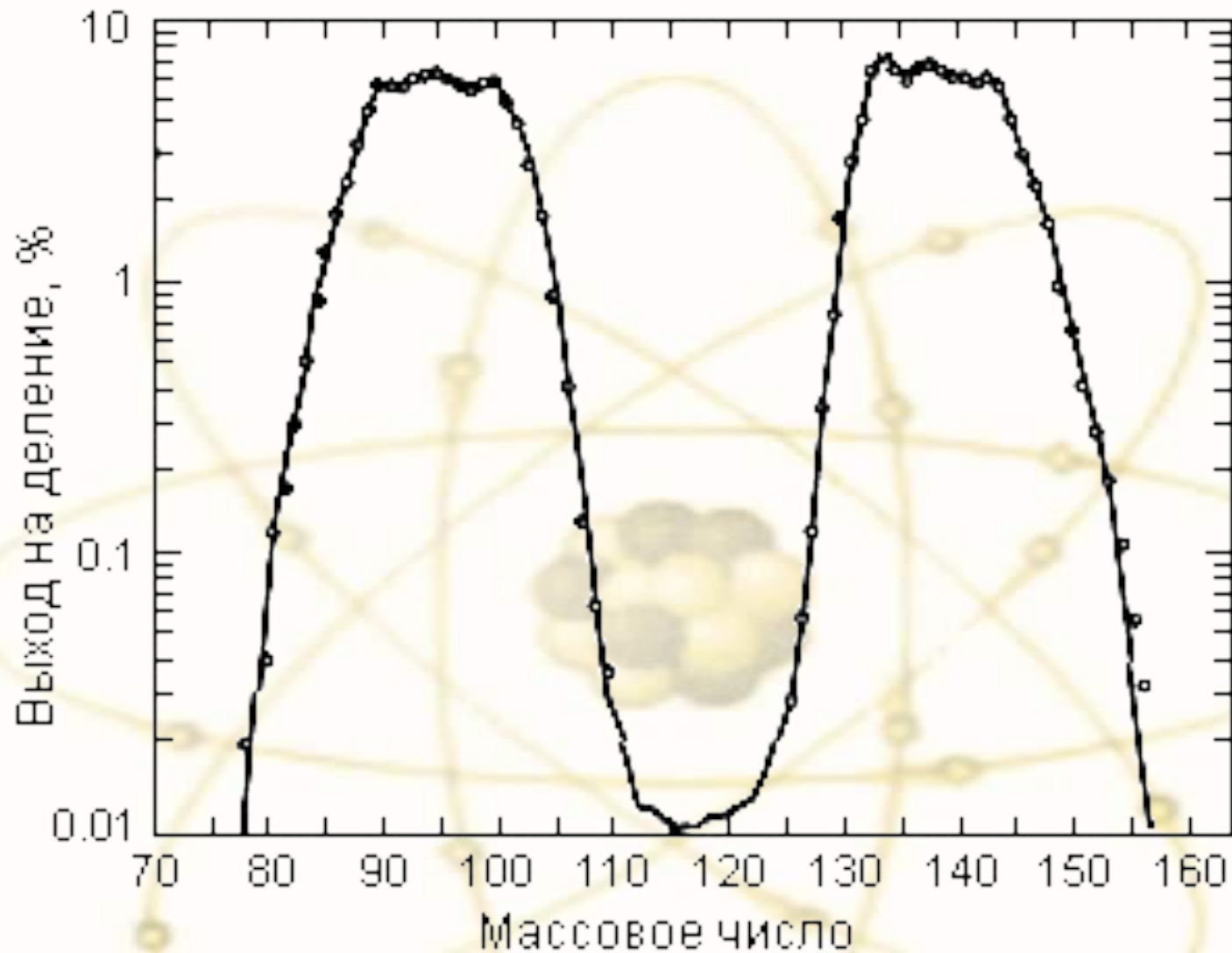
**С увеличением параметра делимости  $Z^2 / A$**

т.е. с уменьшением высоты барьера деления **растет вероятность спонтанного деления**

**Вынужденное деление** ядер с  $Z^2 / A < 49$  **может быть вызвано любыми частицами:** фотонами, нейтронами, протонами, дейтронами,  $\alpha$ -частицами и т.д., **если энергия, которую они вносят в ядро, достаточна для преодоления барьера деления.**

Массы осколков, образующихся при делении тепловыми нейтронами, не равны: **ядро стремится разделиться таким образом, чтобы основная часть нуклонов осколка образовала устойчивый магический остров**





На рисунке приведено распределение по массам при делении  $^{235}\text{U}$ . Наиболее вероятная комбинация массовых чисел – 95 и 139.

В результате деления высвобождается энергия  $\sim 200$  МэВ энергии.

За один акт деления образуется **более двух нейтронов деления со средней энергией  $\sim 2$  МэВ.**

**В 1 г любого вещества содержится**

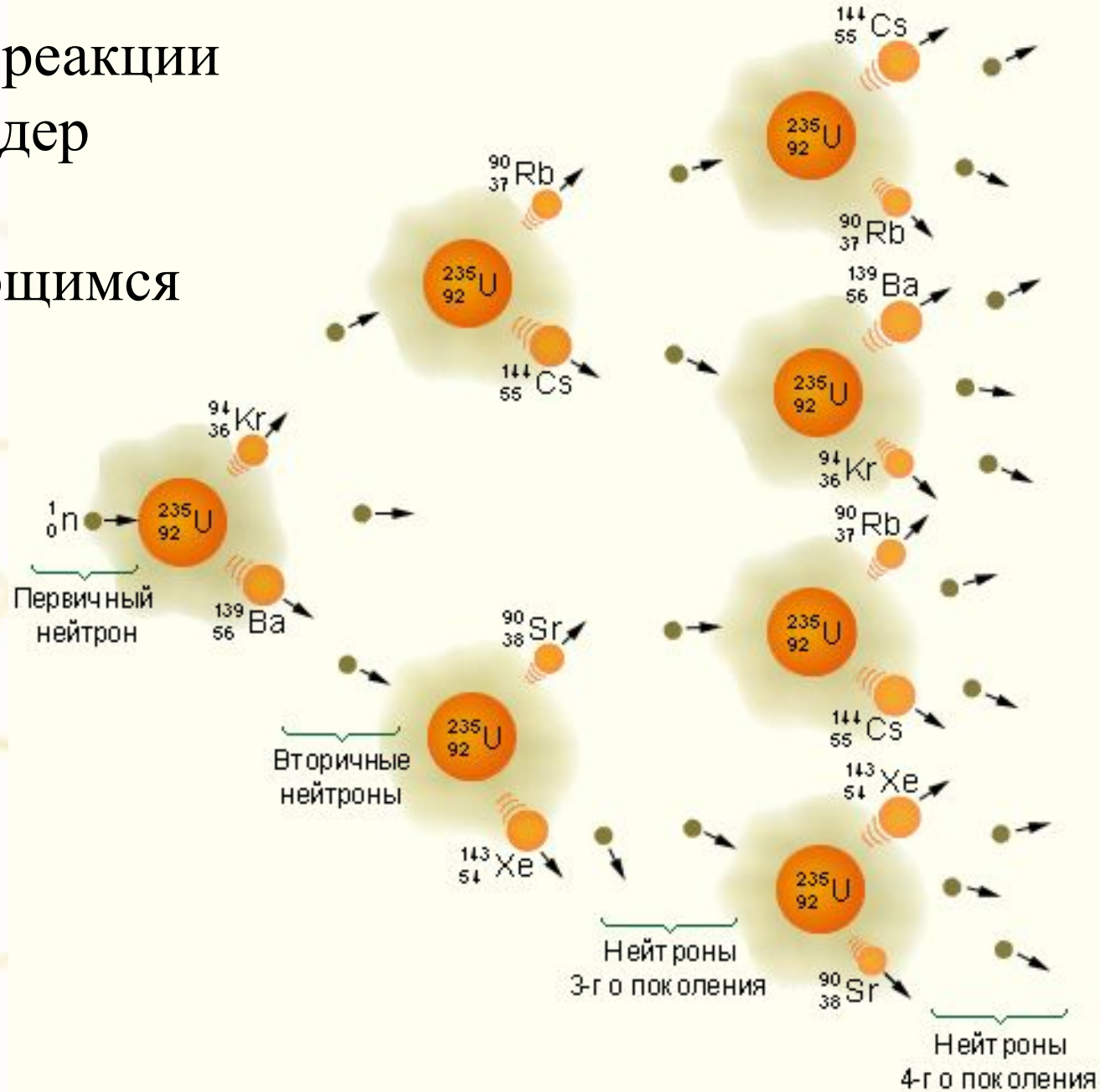
$$mc^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$$

Деление 1 г урана сопровождается выделением  $\sim 9 \cdot 10^{10}$  Дж. Это почти в 3 млн раз превосходит энергию сжигания 1 г угля ( $2,9 \cdot 10^4$  Дж).

**Стоимость 1 Дж энергии, полученной сжиганием угля, оказывается в 400 раз выше, чем в случае уранового топлива.**

Выработка 1 кВт·ч энергии обходилась в 1,7 цента на электростанциях, работающих на угле, и в 1,05 цента на ядерных электростанциях.

Благодаря цепной реакции  
процесс деления ядер  
можно сделать  
самоподдерживающимся



При каждом делении вылетают 2 или 3 нейтрона

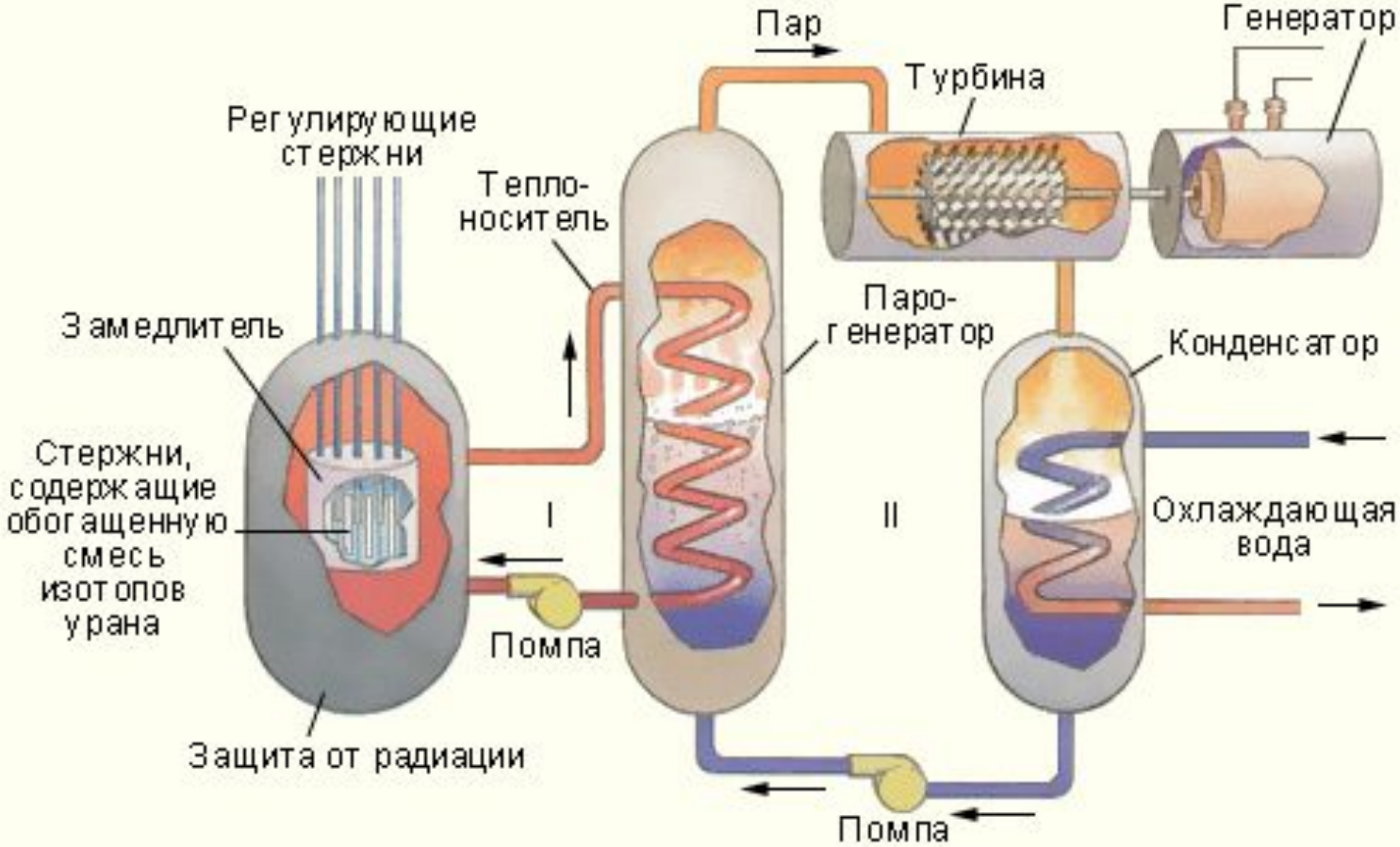
При каждом делении вылетают 2 или 3 нейтрона. Если одному из этих нейтронов удастся вызвать деление другого ядра урана, то процесс будет **самоподдерживающимся**.

Совокупность делящегося вещества, удовлетворяющая этому требованию - **критическая сборка**.

**Первая такая сборка, названная ядерным реактором**, была построена в 1942 г. под руководством Энрико Ферми на территории Чикагского университета в США.

**Первый ядерный реактор** был запущен в 1946 г. под руководством И. Курчатова в Москве.

**Первая атомная электростанция** мощностью 5 МВт была пущена в СССР в 1954 г. в г. Обнинске.



Первая атомная электростанция мощностью 5 МВт была построена пущена в СССР 27.6.1954 г. в г. Обнинске



# Типы ядерных реакторов

Ядерным реактором называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

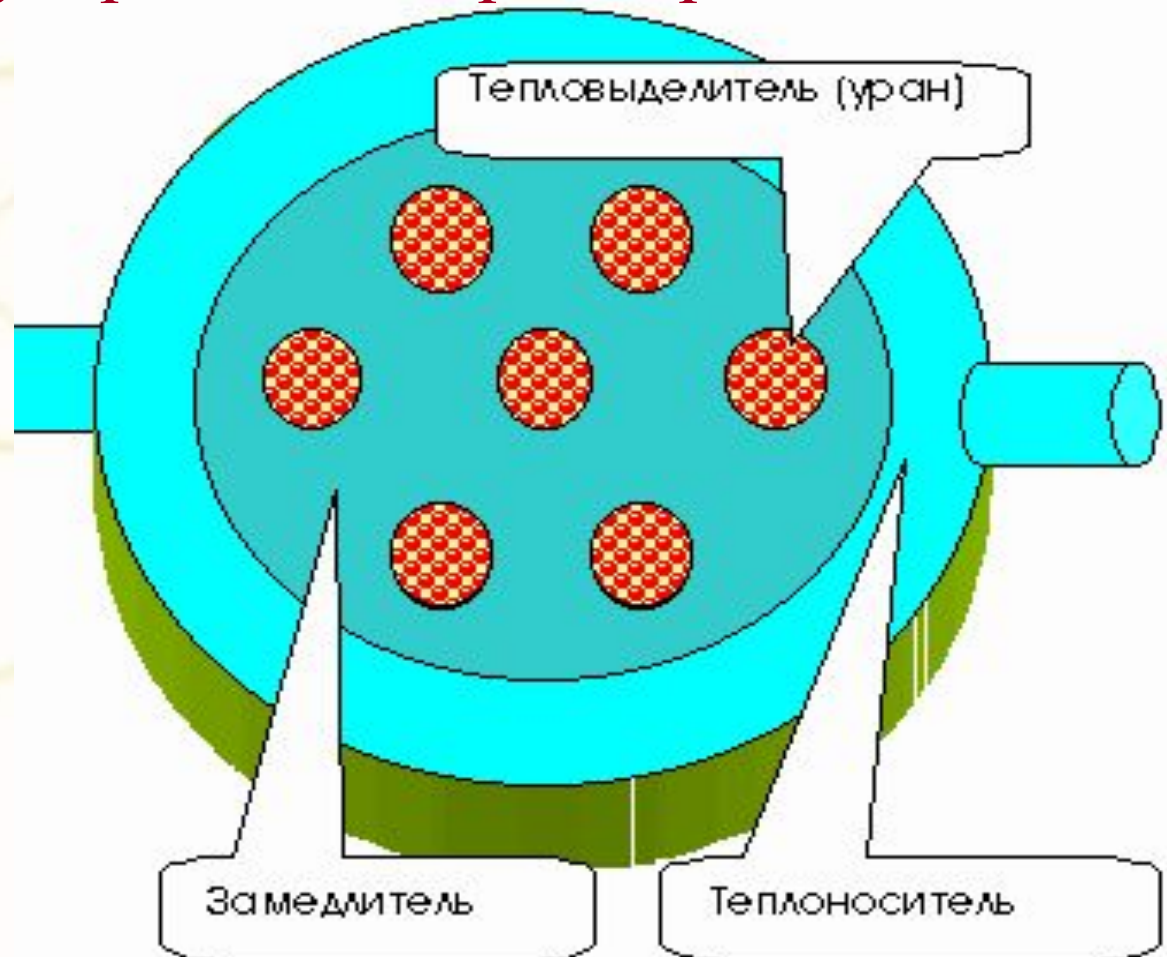
Система управления реактором состоит из набора стержней, состоящих из материала высокопоглощающего нейтроны.

Стержни располагаются в специальных каналах и могут быть подняты или опущены в реактор.

В поднятом состоянии они способствуют разгону реактора, в опущенном - заглушают его.

# Основные элементы активной зоны реактора:

- ядерное топливо,
- замедлитель нейтронов,
- теплоноситель для отвода тепла
- устройство для регулирования скорости реакции.





# Ядерное оружие

Массу Рu и U можно также сделать **надкритической**.  
В этом случае **возникающие при делении нейтроны будут вызывать несколько вторичных делений**.

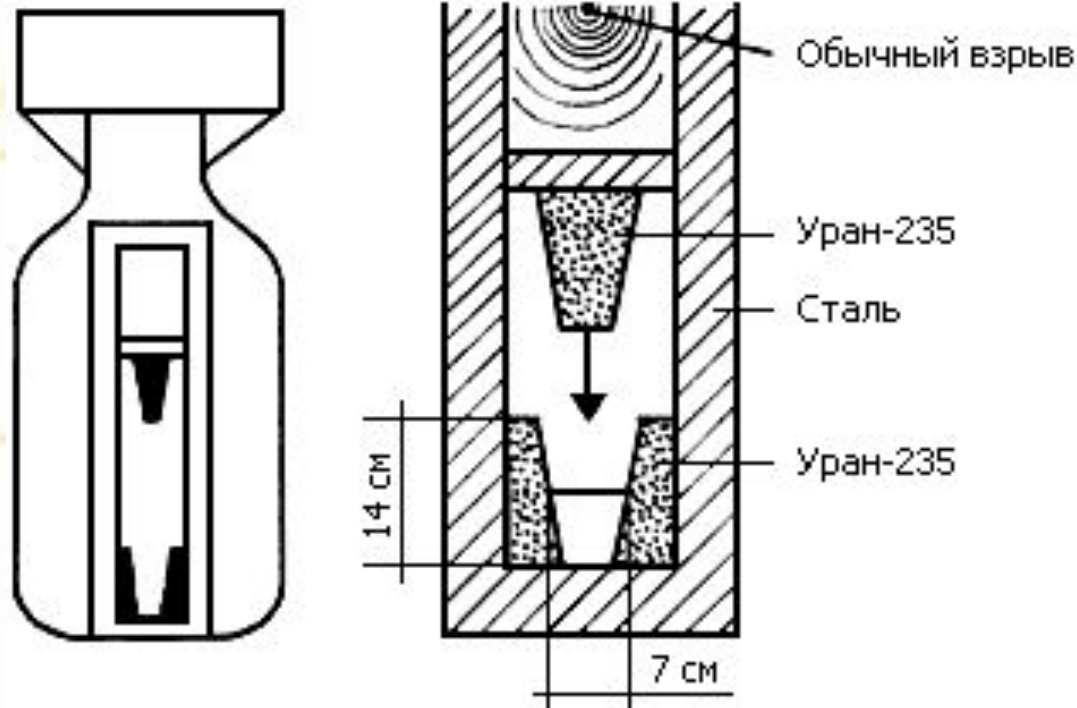
Поскольку нейтроны движутся со скоростями, превышающими  $10^8$  см/с, **надкритическая сборка может полностью прореагировать (или разлететься) быстрее, чем за тысячную долю секунды**.

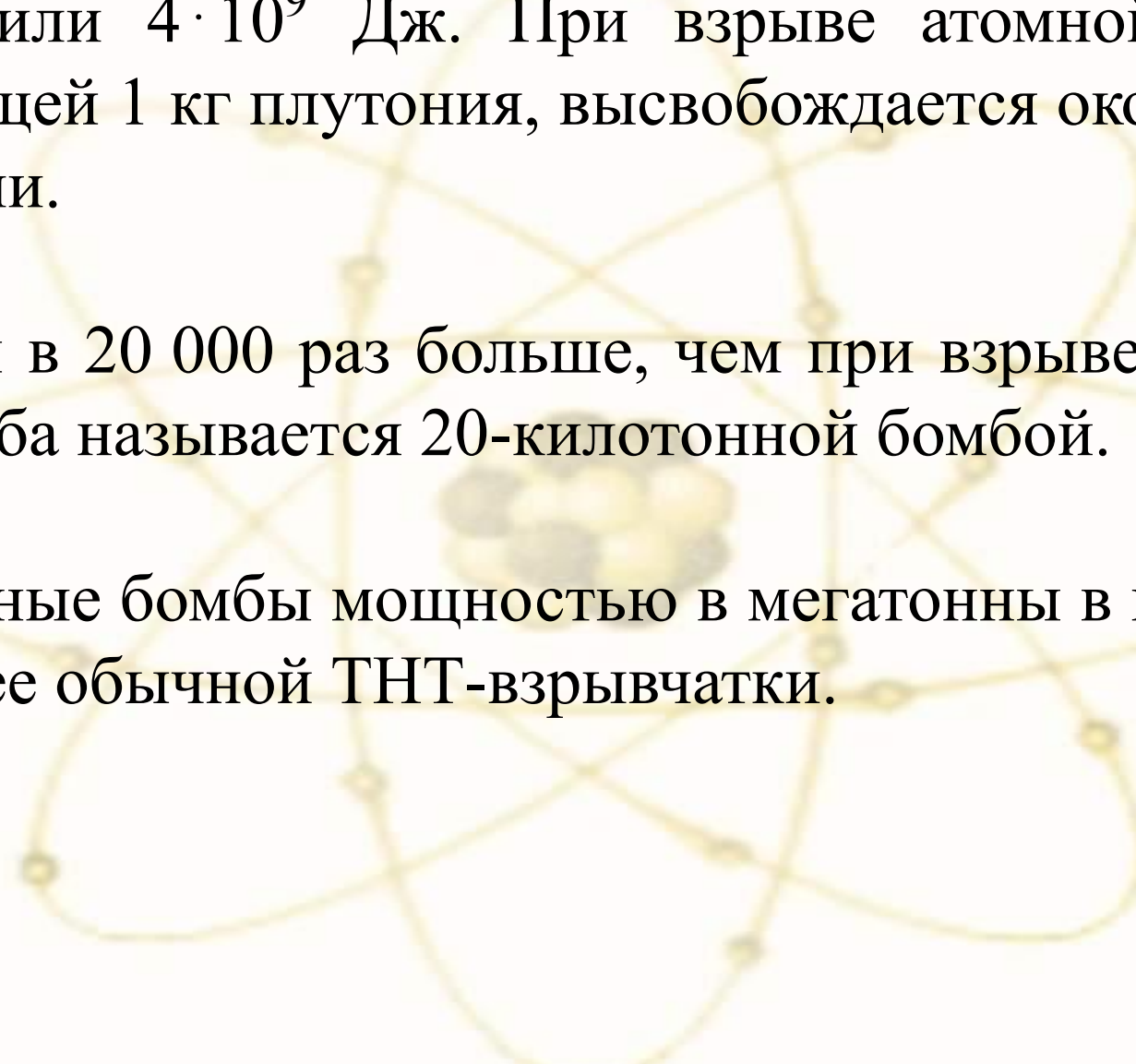
Такое устройство называется **атомной бомбой**

На рис. изображена **схема атомной бомбы «Малыш»**, сброшенной на Хиросиму.

Ядерной взрывчаткой в бомбе служил  $^{235}\text{U}$  разделенный на две части, масса которых была меньше критической.

Необходимая для взрыва критическая масса  $^{235}\text{U}$  создавалась в результате соединения обеих частей «методом пушки» с помощью обычной взрывчатки.





При взрыве 1 т тринитротолуола (ТНТ) высвобождается  $10^9$  кал, или  $4 \cdot 10^9$  Дж. При взрыве атомной бомбы, расходующей 1 кг плутония, высвобождается около  $8 \cdot 10^{13}$  Дж энергии.

Это почти в 20 000 раз больше, чем при взрыве 1 т ТНТ. Такая бомба называется 20-килотонной бомбой.

Современные бомбы мощностью в мегатонны в миллионы раз мощнее обычной ТНТ-взрывчатки.

# 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.

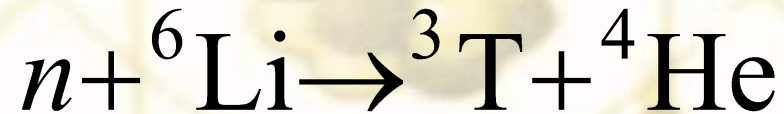
Для получения управляемой термоядерной энергии и для инициирования термоядерного взрыва водородной бомбы необходима температура около  $5 \cdot 10^7$  К.

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

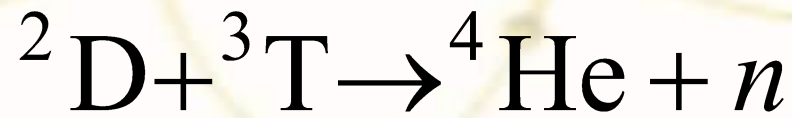
Мгновенные температуры, развивающиеся при взрыве атомной бомбы, оказываются достаточно высокими, чтобы поджечь термоядерное горючее.

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



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.

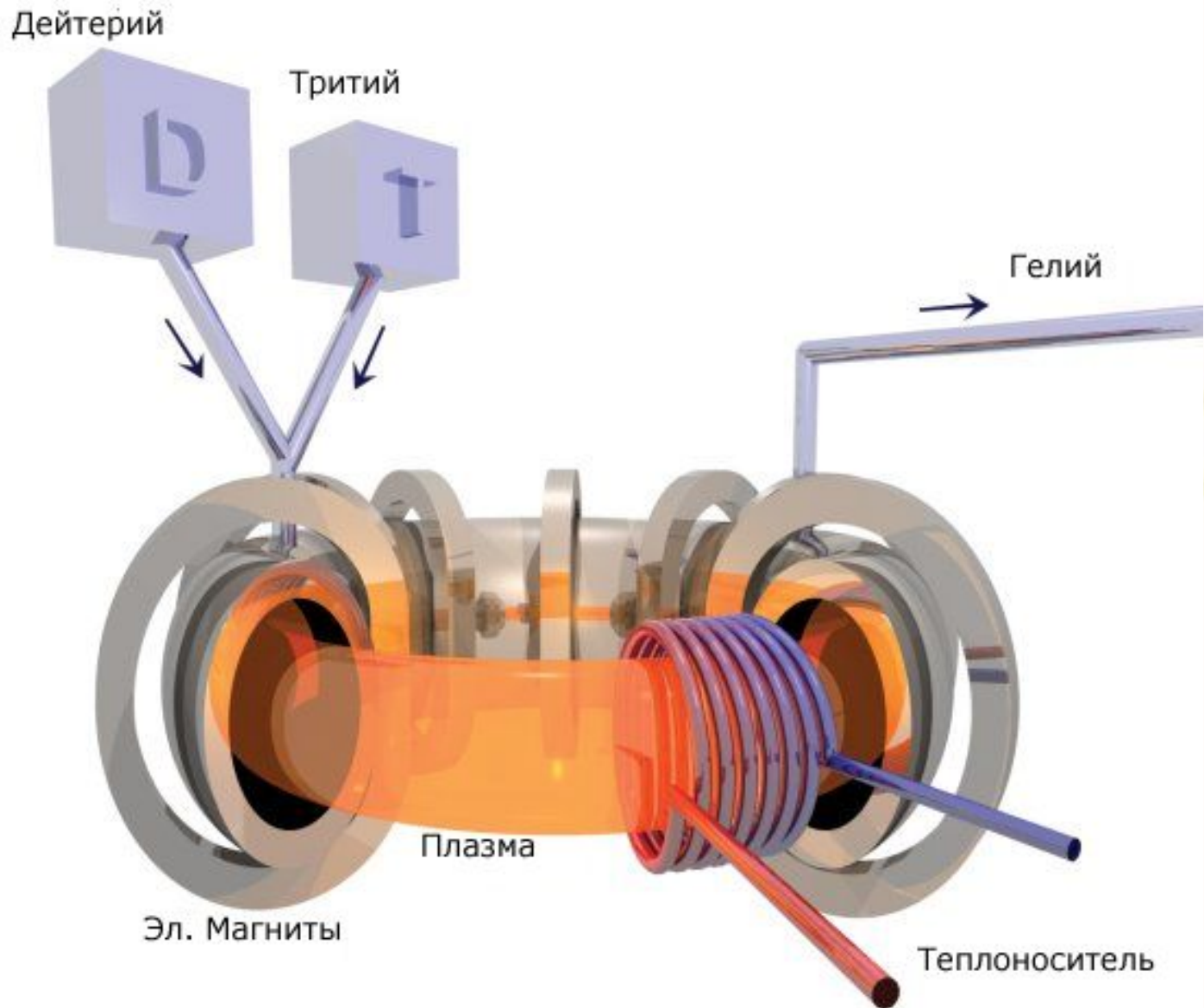
# Управляемый синтез

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

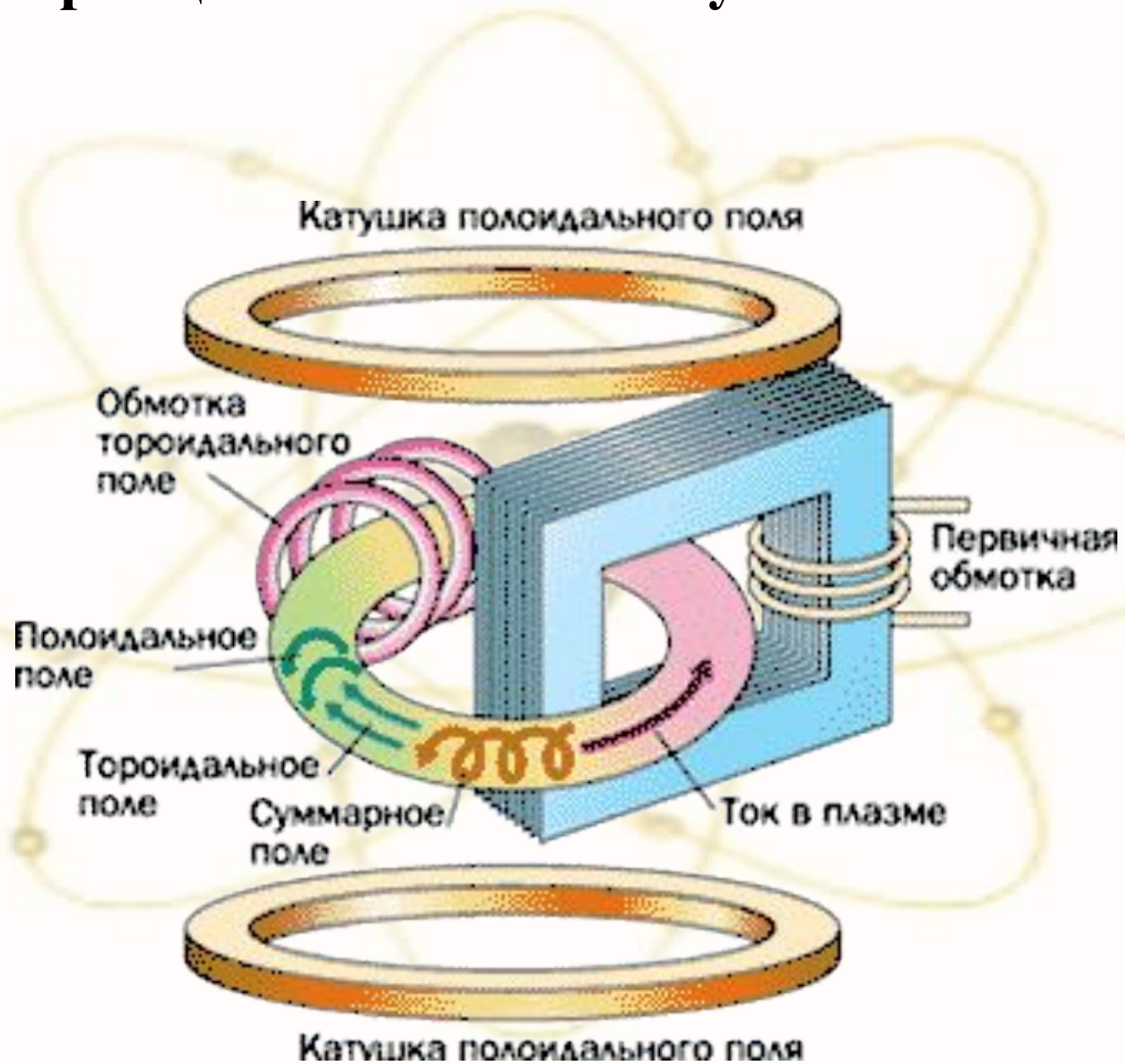
Необходимо найти способы создания и поддержания температур во много миллионов градусов.

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

На рисунке показана предполагаемая схема конструкции термоядерного реактора.



# Принципиальная схема установки:



## Радиационная безопасность

Количество несчастных случаев, связанных с атомной энергетикой, значительно меньше на АЭС, чем в других областях человеческой деятельности.

Тем не менее, несколько лет назад происшедшая авария в Чернобыле заставляет пересмотреть наше отношение к организации безопасности работы АЭС и защиты от неконтролируемого развития ядерной реакции.

Необходимо дальнейшее снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций, хотя, вероятно, полностью избежать их никогда не удастся.

Название элемента	Характеристика элемента и меры предосторожности	Период полураспада
Радон-222	Газ, испускающий $\alpha$ - частицы. Образуется в горных породах. Опасен при накоплении в шахтах, подвалах, необходимо проветривание.	3,8 суток
Ксенон-133	Газообразные изотопы. Образуются и распадаются в процессе работы атомного реактора. В качестве защиты- изоляция	5 суток
Йод-131	Испускает $\beta$ – частицы и $\gamma$ – излучение. Образуется при работе атомного реактора. Вместе с зеленью усваивается животными и переходит в молоко. Накапливается в щитовидной железе человека. В качестве защиты от облучения применяют «йодную диету», т.е. вводят в рацион человека стабильный йод.	8 суток
Криптон-85	Тяжелый газ, испускающий $\beta$ – частицы и $\gamma$ – излучение. Входит в состав отработанного топливного элемента реактора. Выделяется при ох хранения. Защита – изолированное помещение.	10 лет
Стронций -90	Металл, испускающий $\beta$ – частицы. Основной продукт деления в радиоактивных отходах. Накапливается в костных тканях человека.	29 лет
Цезий-137	Металл, испускающий $\beta$ – частицы и $\gamma$ – излучение. Накапливается в клетках мышечной ткани.	30 лет
Радий-226	Тяжелый газ, испускающий $\alpha$ – частицы, $\beta$ – частицы и $\gamma$ – излучение. Защита – укрытия, убежища	1600 лет
Углерод-14	Испускает $\beta$ – частицы. Естественный природный изотоп углерода. Используется при определении возраста материала.	5500 лет
Плутоний-239	Испускает $\alpha$ – частицы. Содержится в радиоактивных отходах. Защита – качественное захоронение радиоактивных отходов.	24000 лет
Калий-40	Испускает $\beta$ – частицы и $\gamma$ – излучение. Содержится и замещается во всех растениях и животных	70 1,3 млрд. лет

# Биологическое действие ионизирующих излучений и способы защиты от них

Различают два вида эффекта воздействия на организм ионизирующих излучений: **соматический** и **генетический**

**При соматическом эффекте последствия проявляются непосредственно у облучаемого, при генетическом – у его потомства.**

Соматические эффекты могут быть ранними или отдалёнными.

Ранние возникают в период от нескольких минут до 30–60 суток после облучения. К ним относят покраснение и шелушение кожи, помутнение хрусталика глаза, поражение кроветворной системы, лучевая болезнь.

## **Острая лучевая болезнь легкой степени тяжести**

развивается при воздействии излучения в дозе 1–2.5 Гр.

Первичная реакция (первые 2–3 дня) – головокружение, тошнота. Латентный период (около 1 месяца) – постепенное снижение первичных признаков. Восстановление полное.

## **Острая лучевая болезнь средней степени тяжести**

развивается при воздействии излучения в дозе 2.5–4 Гр.

Первичная реакция (первые 1–2 часа) – головокружение, тошнота, рвота. Латентный период (около 25 дней) – наличие изменения слизистых оболочек, инфекционных осложнений, возможен летальный исход.



**Острая лучевая болезнь тяжелой степени** развивается при воздействии излучения в дозе 4–10 Гр. Первичная реакция (первые 30–60 минут) – головная боль, повторная рвота, повышение температуры тела. Латентный период (около 15 дней) – инфекционные поражения, поражения слизистых оболочек, лихорадка. Частота летальных исходов выше, чем при средней степени тяжести.

**Острая лучевая болезнь крайне тяжелой степени** развивается при воздействии излучения в дозе более 10 Гр. **Летальный исход почти неизбежен.**

Несмотря на ту опасность, которую представляет атомная энергетика, она является той экологически чистой индустрией, на которую возлагает свои надежды все передовое человечество.