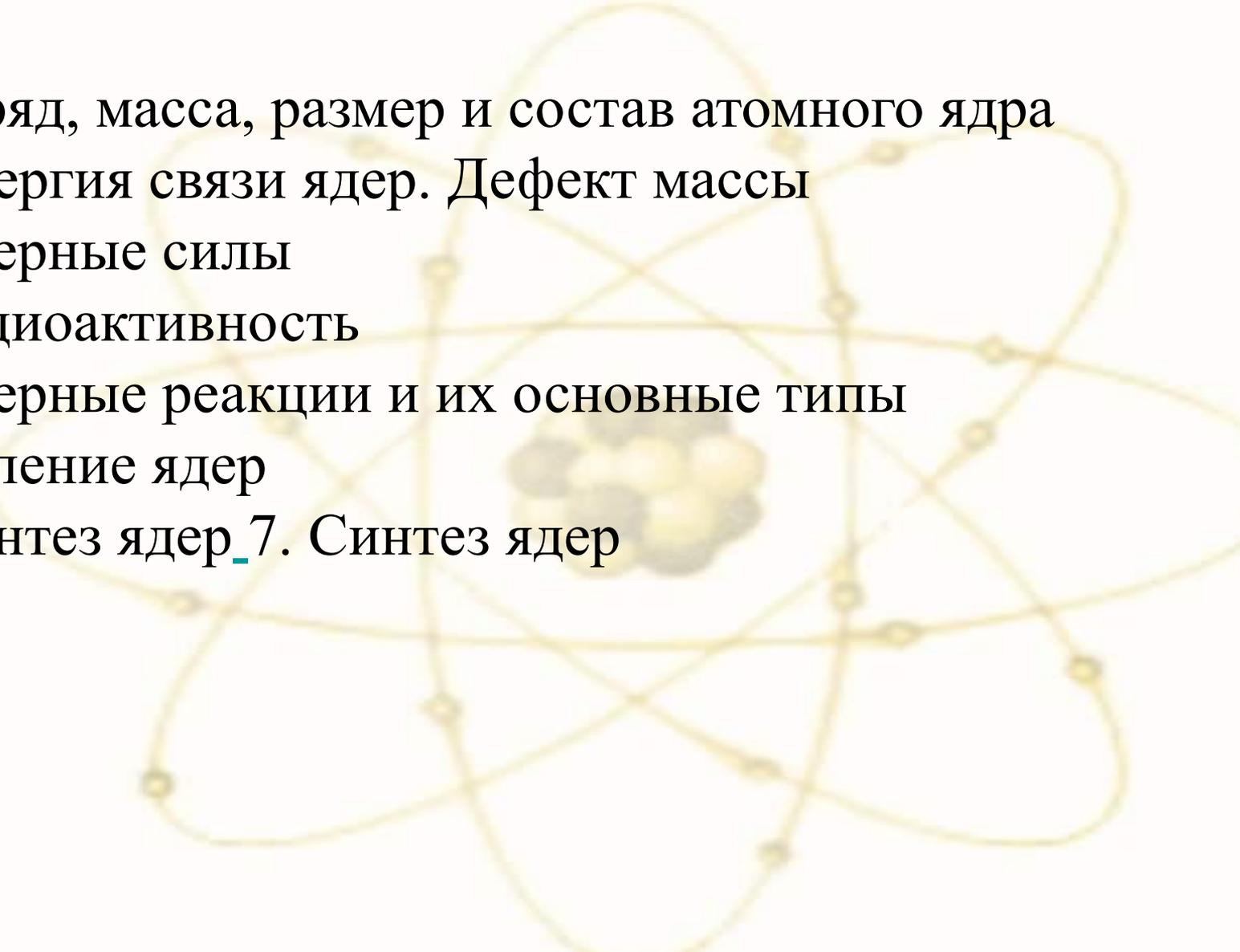
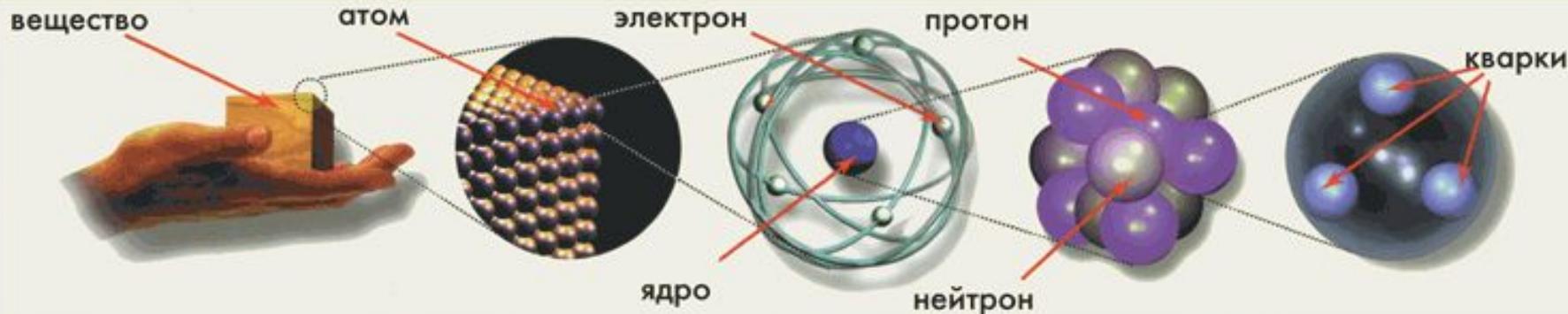


ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

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.	Электрон переносит электрической ток $M = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$		Электронное нейтрино 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.	Мюон аналог электрона, время жизни – 2 микросекунды $M = 106 \text{ МэВ}/c^2$		Мюонное нейтрино образуется при рождении и распаде мюонов. $M < 0.2 \text{ МэВ}/c^2$	
	Тау аналог электрона, время жизни – $3 \cdot 10^{-13}$ $M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$		Тау нейтрино образуется при рождении и распаде тау лептонов, открыто в 1975 г. $M < 20 \text{ МэВ}/c^2$	

КВАРКИ

Электрический заряд	+2/3		-1/3	
	Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.	u-кварк входит в состав протонов и нейтронов. $M = 3 \text{ МэВ}/c^2$		d-кварк 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.	s-кварк (сcharованный) открыт в 1974 г. $M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$		z-кварк (странный) открыт в 1964 г. $M = 100 \text{ МэВ}/c^2$	
	t-кварк открыт в 1995 г. $M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$		b-кварк (прелестный) открыт в 1977 г. $M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$	

Кванты фундаментальных полей

Глюоны кванты сильных взаимодействий		Фотоны кванты электромагнитных полей	
Взаимодействуют:	кварки и глюоны	Все заряженные частицы	

Промежуточные векторные бозоны кванты слабых взаимодействий		Гравитоны кванты гравитации	
Взаимодействуют:	кварки, лептоны, промежуточные бозоны	все частицы	

Объекты:	протон, нейтрон, атомные ядра, пи-мезон и др. мезоны	атомы, молекулы
Процессы:	деление и синтез атомных ядер	электричество, магнетизм, распространение света, радиоволны

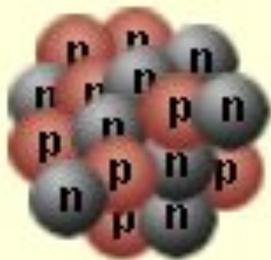
Объекты:	солнечная система, галактики, черные дыры
Процессы:	притяжение тел

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

Протон имеет:

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

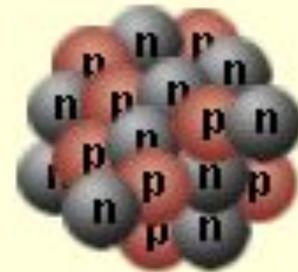
массу покоя $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = $1836m_e$.



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



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



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

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.

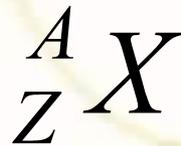
В настоящее время известны ядра с

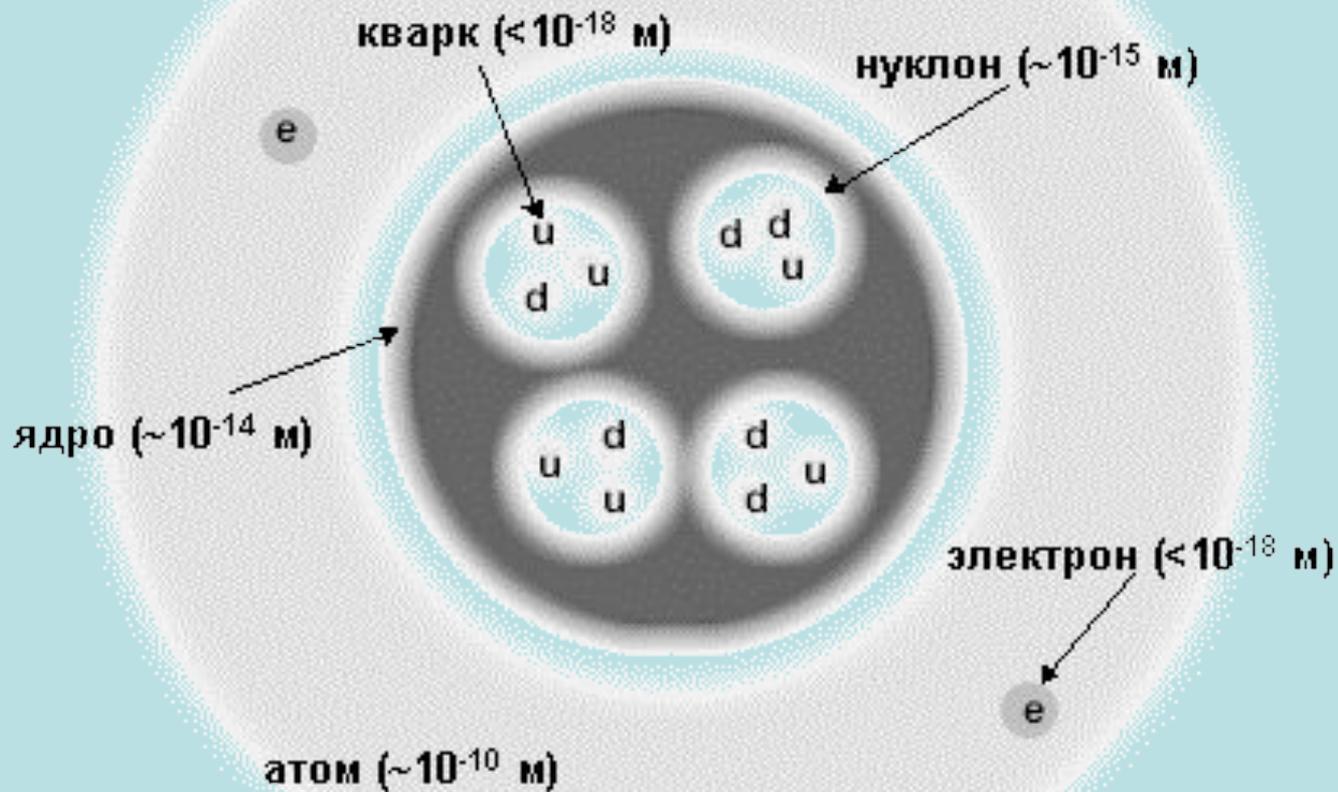
$$Z = 1 \quad \text{до} \quad Z = 107 - 118$$

$A = Z + N$ 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} 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.

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

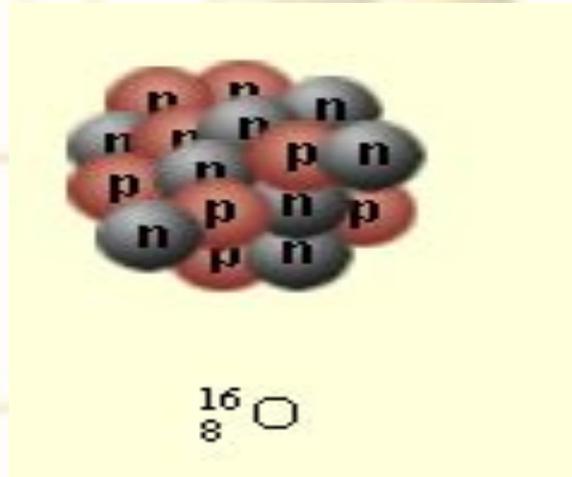
$$\mu_p \approx 2,793 \mu_{\text{яд}}$$

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 Δm , равна:

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

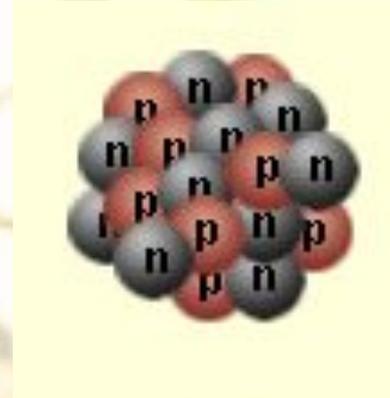
называется **дефектом масс**.

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

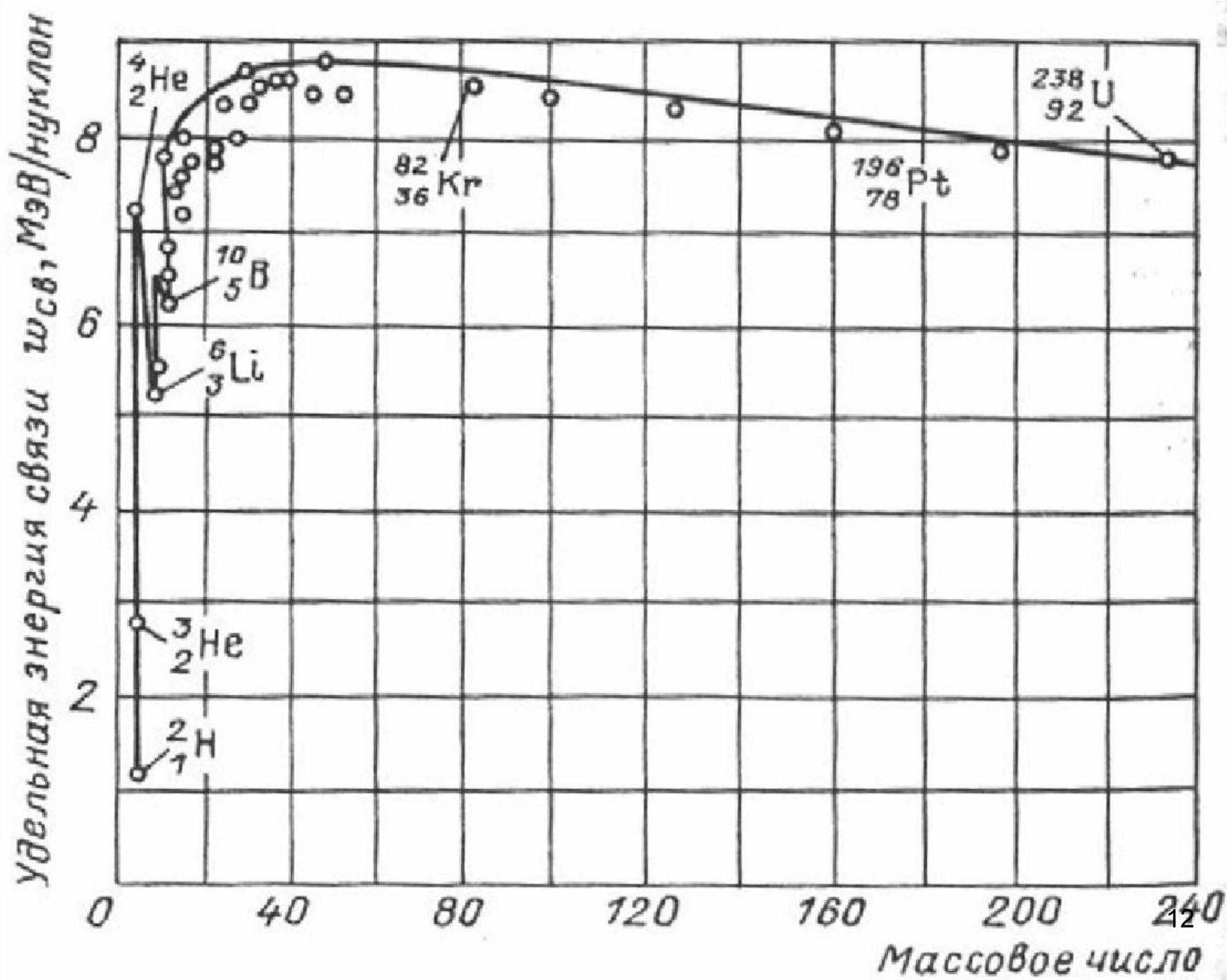
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}}$$

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

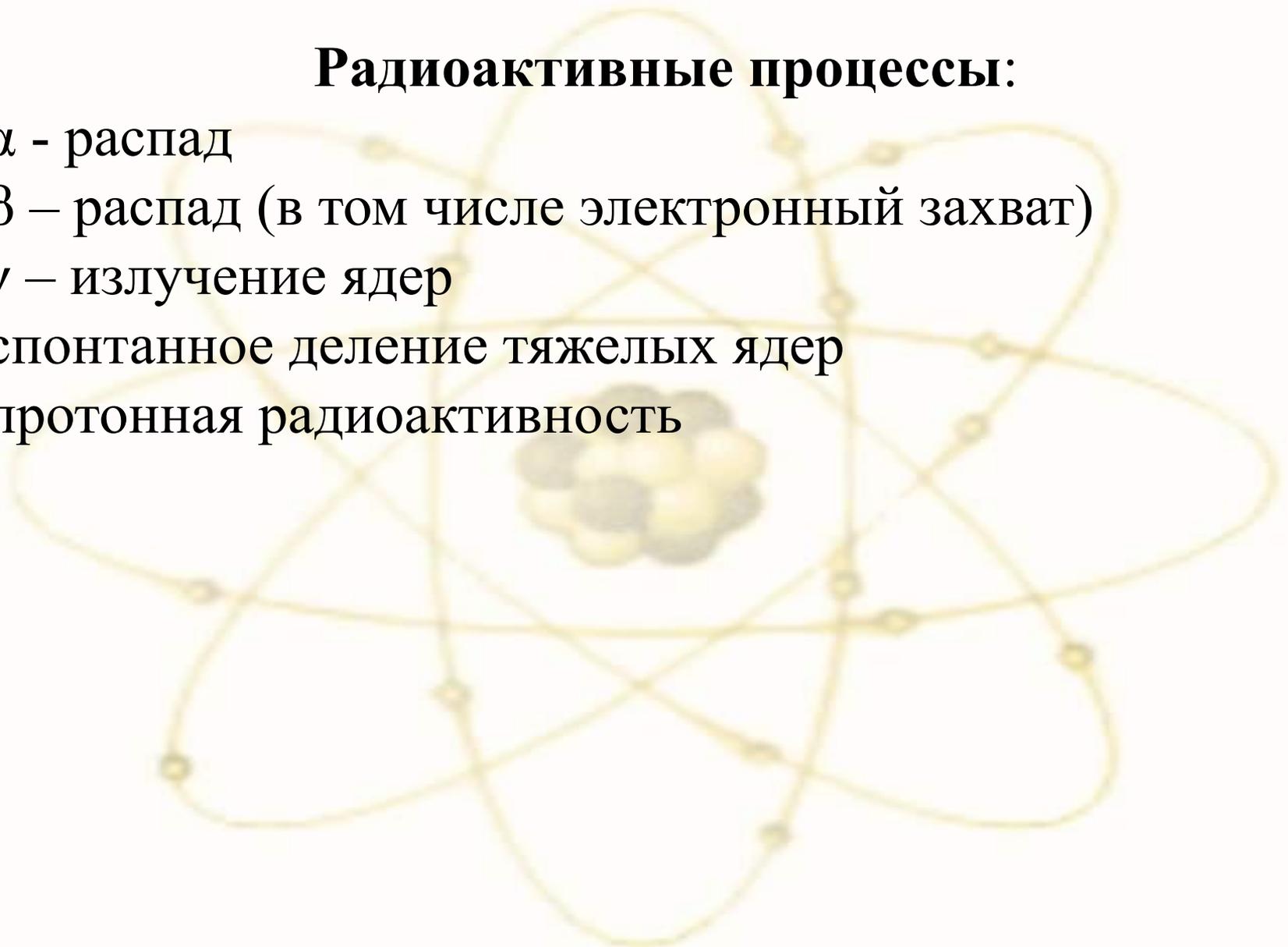
Радиоактивностью называется превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

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

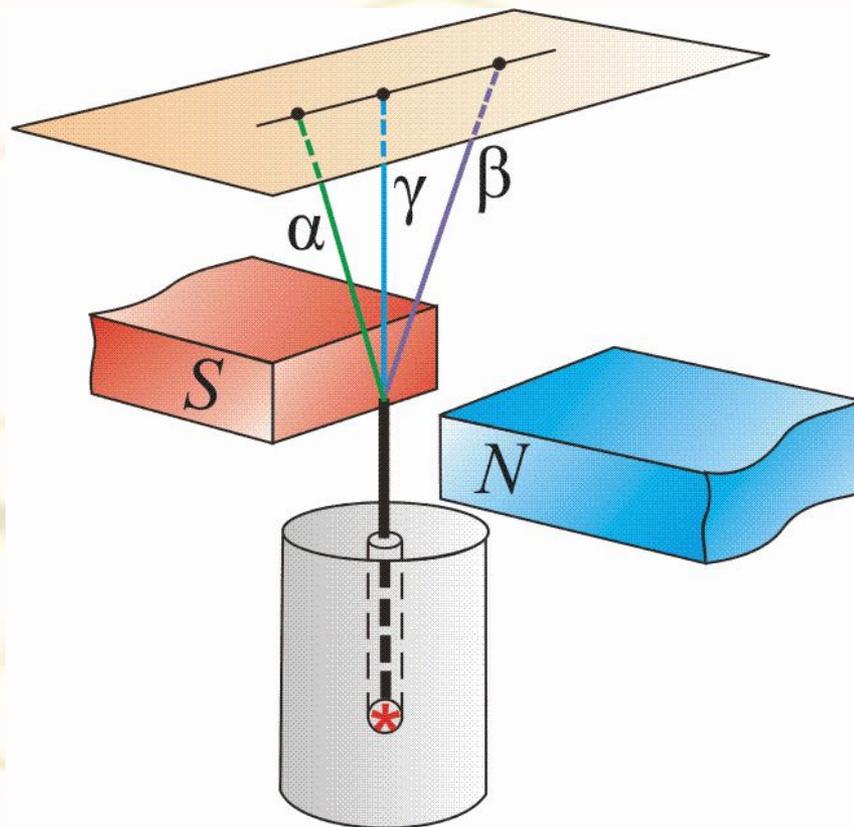
Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

Радиоактивные процессы:

- α - распад
- β – распад (в том числе электронный захват)
- γ – излучение ядер
- спонтанное деление тяжелых ядер
- протонная радиоактивность



Поведение разных типов радиоактивного излучения в магнитном поле:

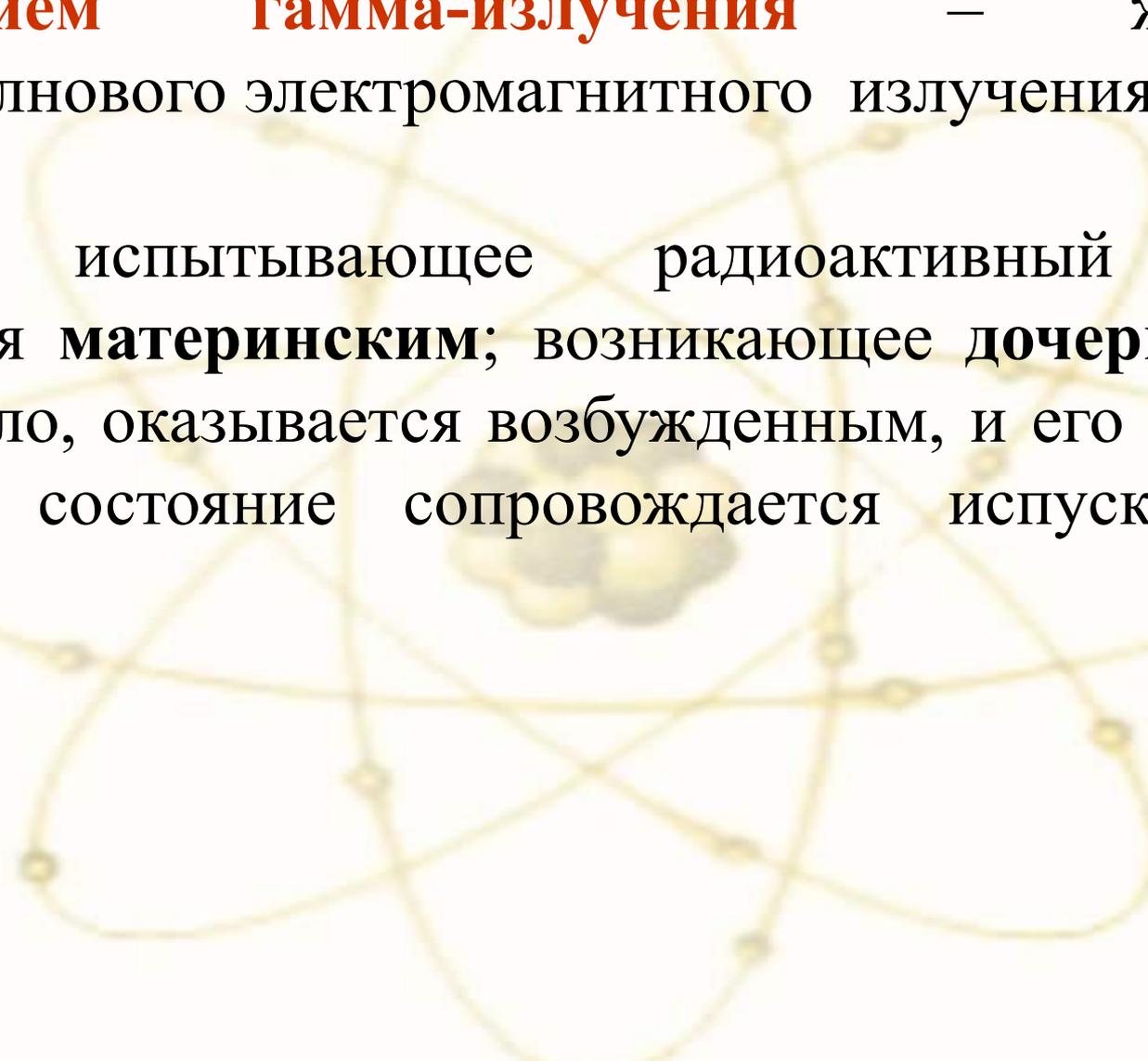


- Альфа-лучи отклоняются в ту же сторону, что и поток положительно заряженных частиц
- Бета-лучи – в противоположную сторону (как поток отрицательных частиц)
- Гамма-лучи никак не реагируют на действие магнитного поля

Тип радиоактивности	Изменение Заряда ядра Z	Изменение массового числа A	Характер процесса
Альфа-распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет α -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
Бета-распад	$Z \pm 1$	A	Взаимные превращения в ядре нейтрона $(\begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \end{smallmatrix}n)$ и протона $(\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}p)$
β_- – распад	$Z + 1$	A	$\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}n \rightarrow \begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}p + (\begin{smallmatrix} 0 \\ -1 \end{smallmatrix}e + \begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \end{smallmatrix}\tilde{\nu}_e)$
β_+ – распад	$Z - 1$	A	$\begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix}p \rightarrow \begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}n + (\begin{smallmatrix} 0 \\ 1 \end{smallmatrix}e + \begin{smallmatrix} 0 \\ 0 \end{smallmatrix}\nu_e)$
Электронный захват (e^- или К-захват)	$Z - 1$	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.
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	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 γ -**
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 ,

λ – 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 τ) радиоактивного изотопа.

Средняя продолжительность τ 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 λ 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 λ' .

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

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



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

- число распадов в единицу времени.

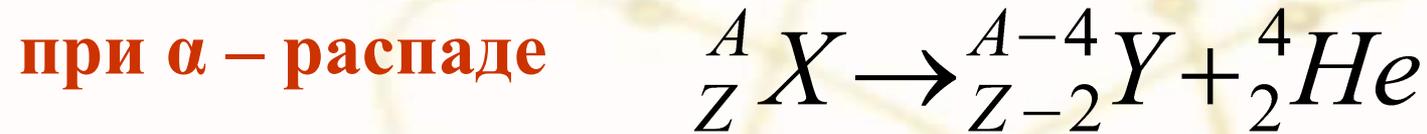
Единица измерения активности - **беккерель (Бк)** =
распад в секунду.

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 α - и β_- – 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 γ -квантами) или друг с другом.

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

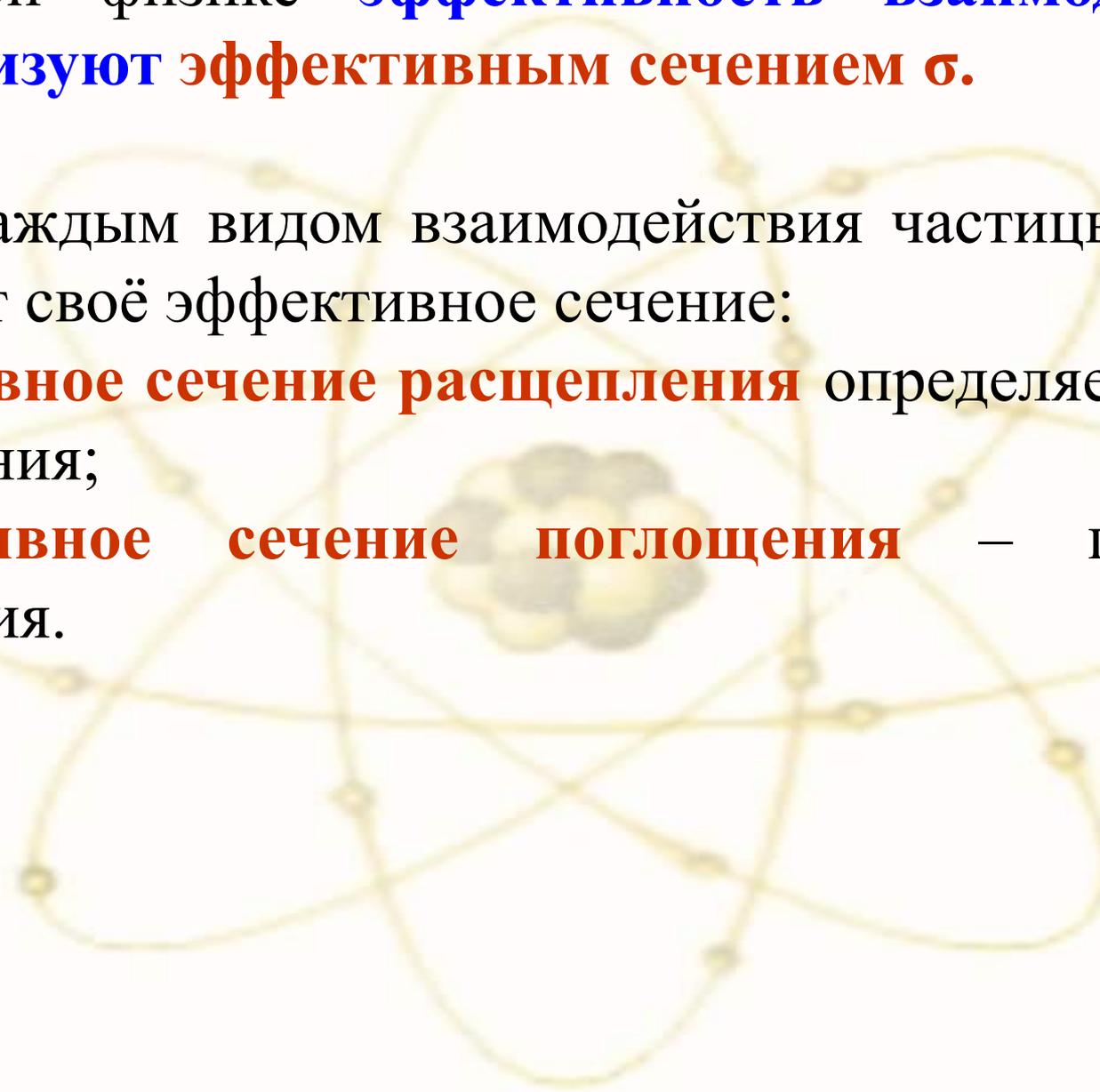


где X и Y – исходные и конечные ядра,
 a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В ядерной физике **эффективность взаимодействия** характеризуют **эффективным сечением σ** .

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 .

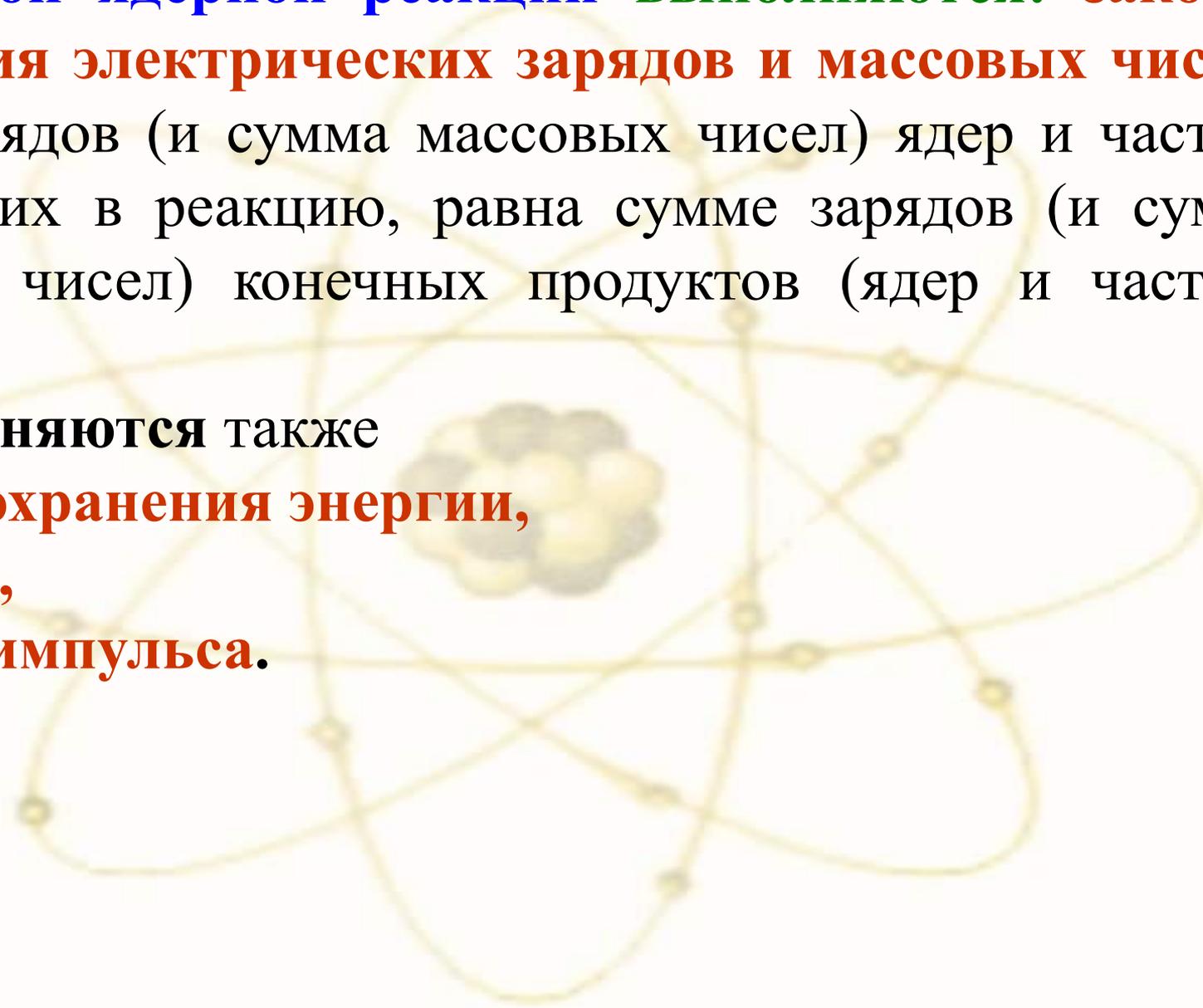
Эффективное сечение σ имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдёт реакция.

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

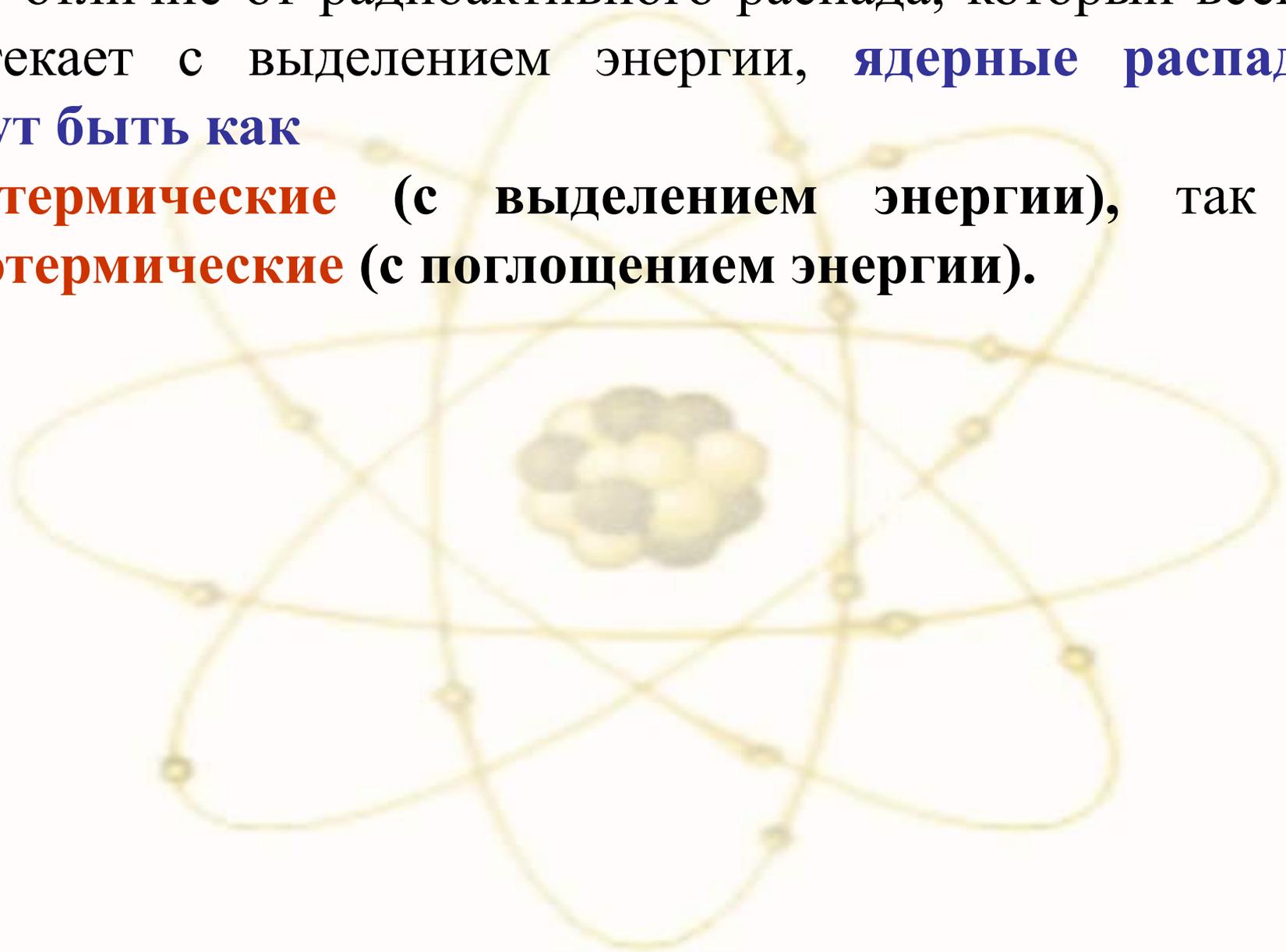
В любой ядерной реакции выполняются: законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.

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)**.

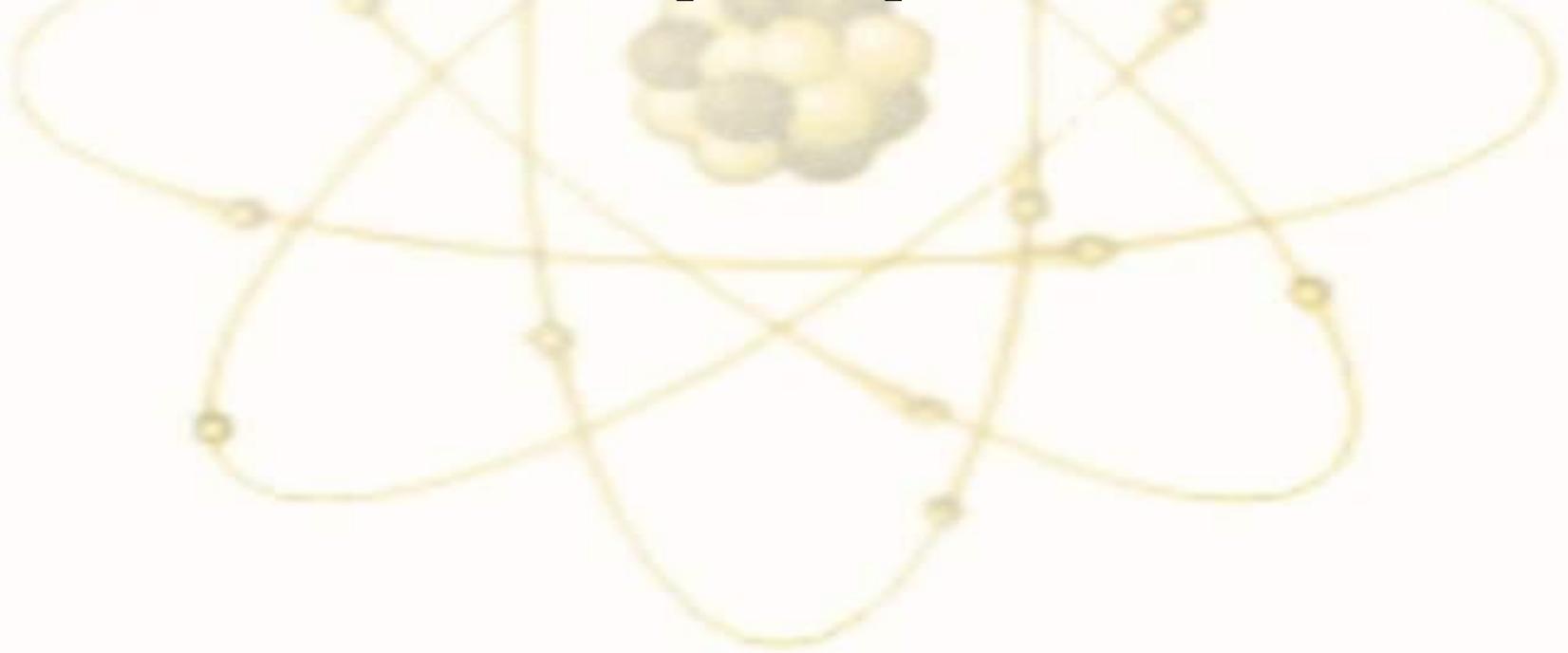


Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в **возбуждённом состоянии**.

При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон или α -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.

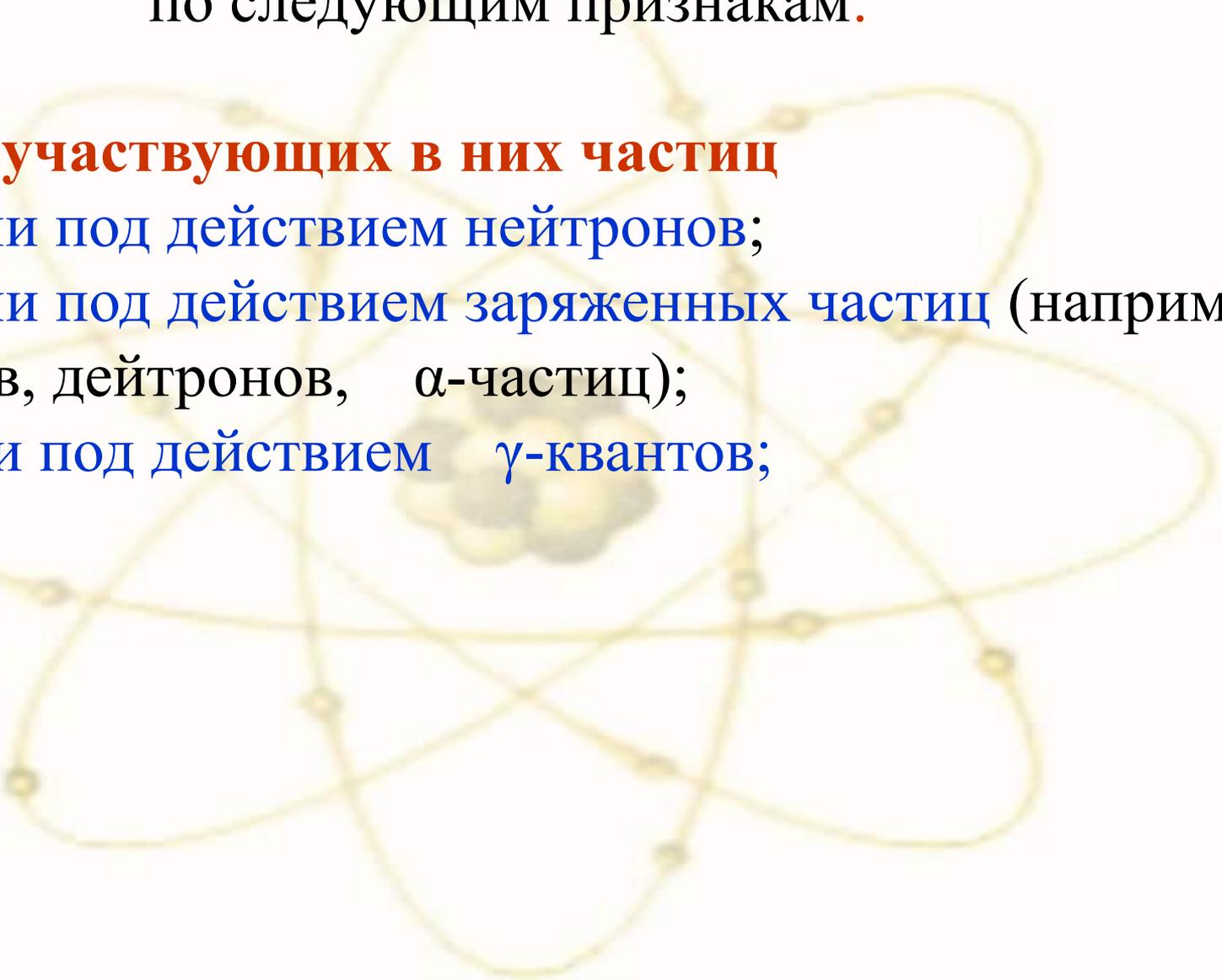
Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями (например, реакция вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

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, α -частиц);
- реакции под действием γ -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 γ -квантов и заряженных частиц (протон, α -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 γ -квантов).

6. Деление ядер

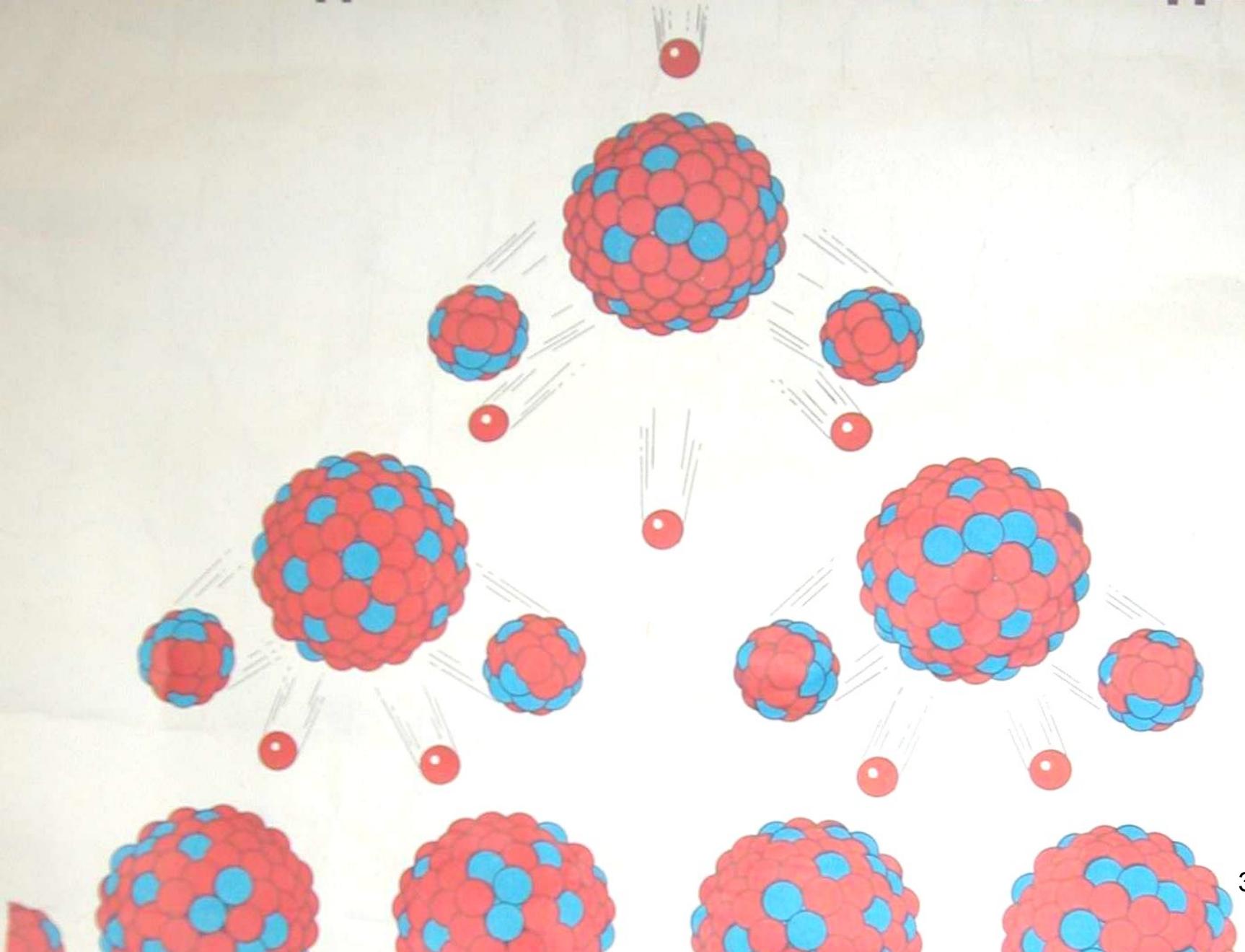
Задача была решена немецкими физиками Л. Мейтнер и О. Фришем, показавшими, что **при поглощении нейтронов ураном происходит деление ядра на два осколка.**

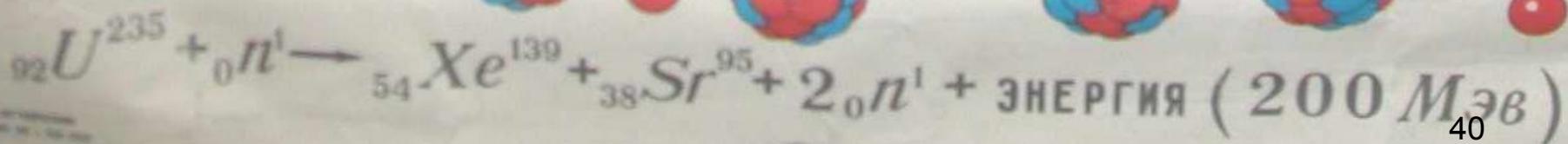
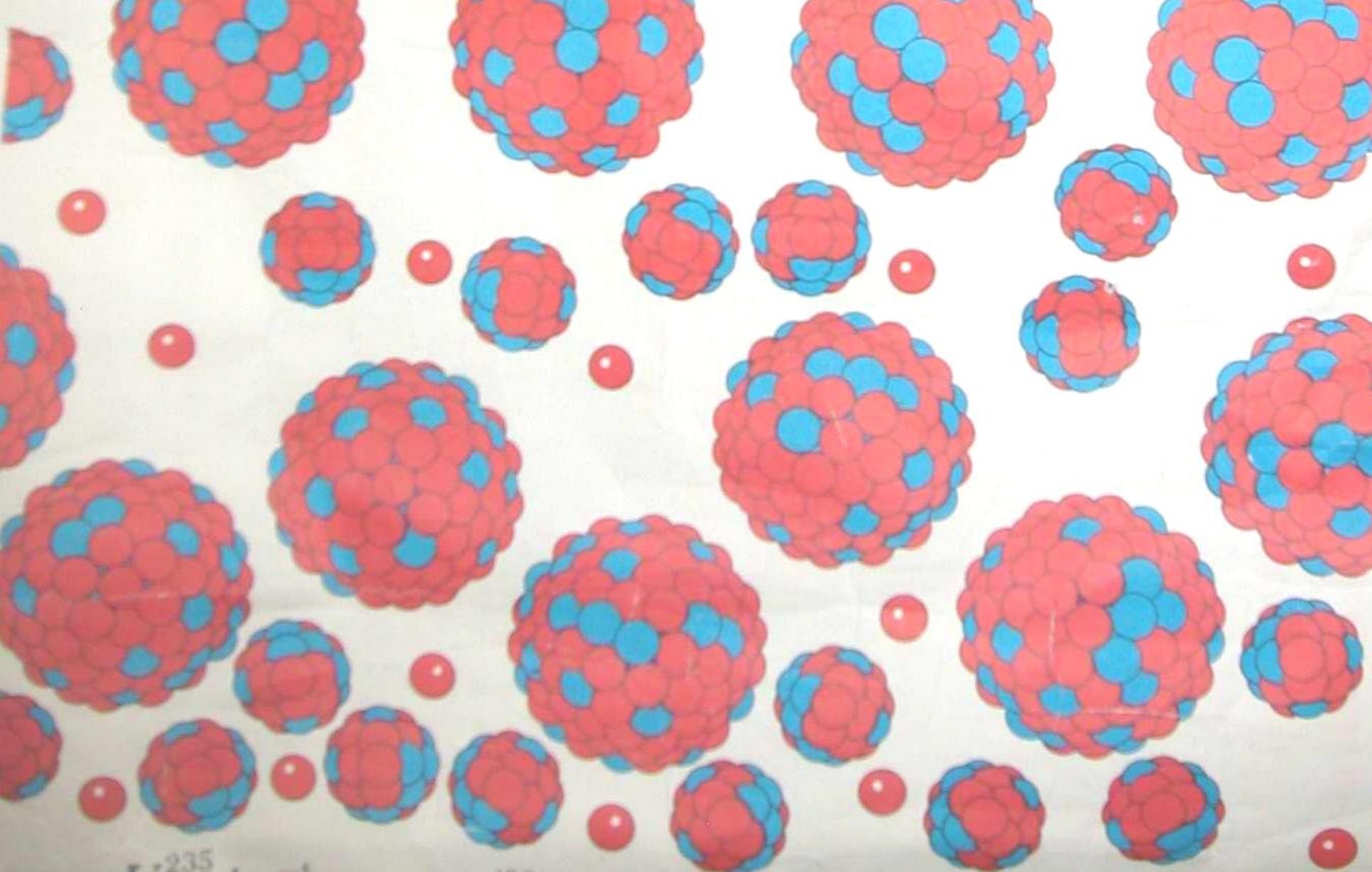


где $k > 1$.

При делении ядра урана тепловой нейтрон с энергией $\sim 0,1$ эВ освобождает энергию ~ 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 ΔM (дефект масс).

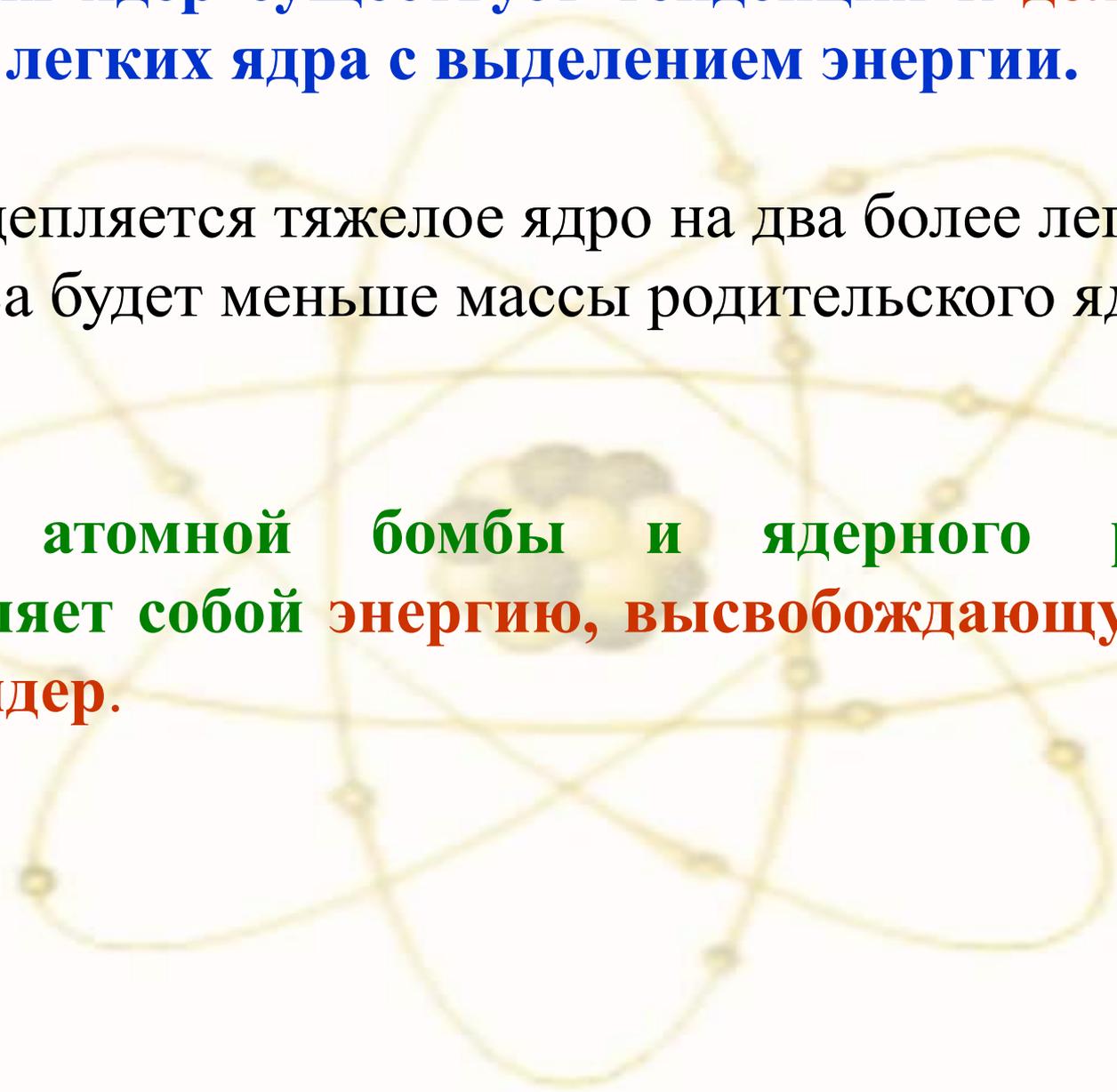
При соединении легкие ядра сольются с выделением энергии ΔMc^2 . Этот процесс называется синтезом ядер. Разность масс может превышать 0,5%.

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 $E_{\text{к}} = \alpha_3 Z^2 / A^{1/3}$,

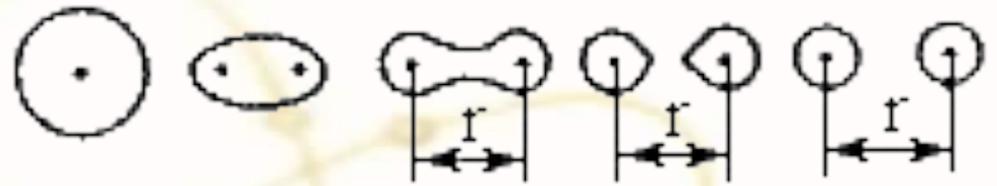
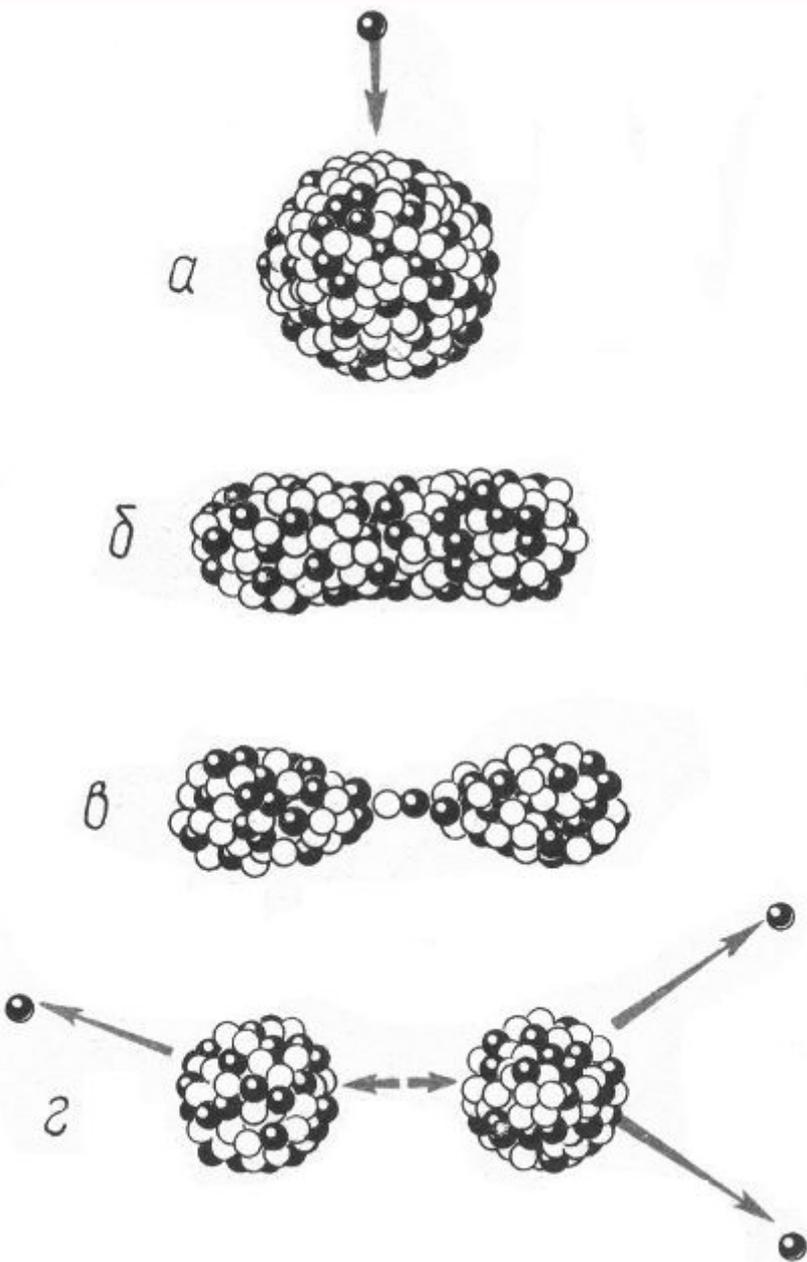
причем поверхностная энергия увеличивается, а кулоновская энергия уменьшается.

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

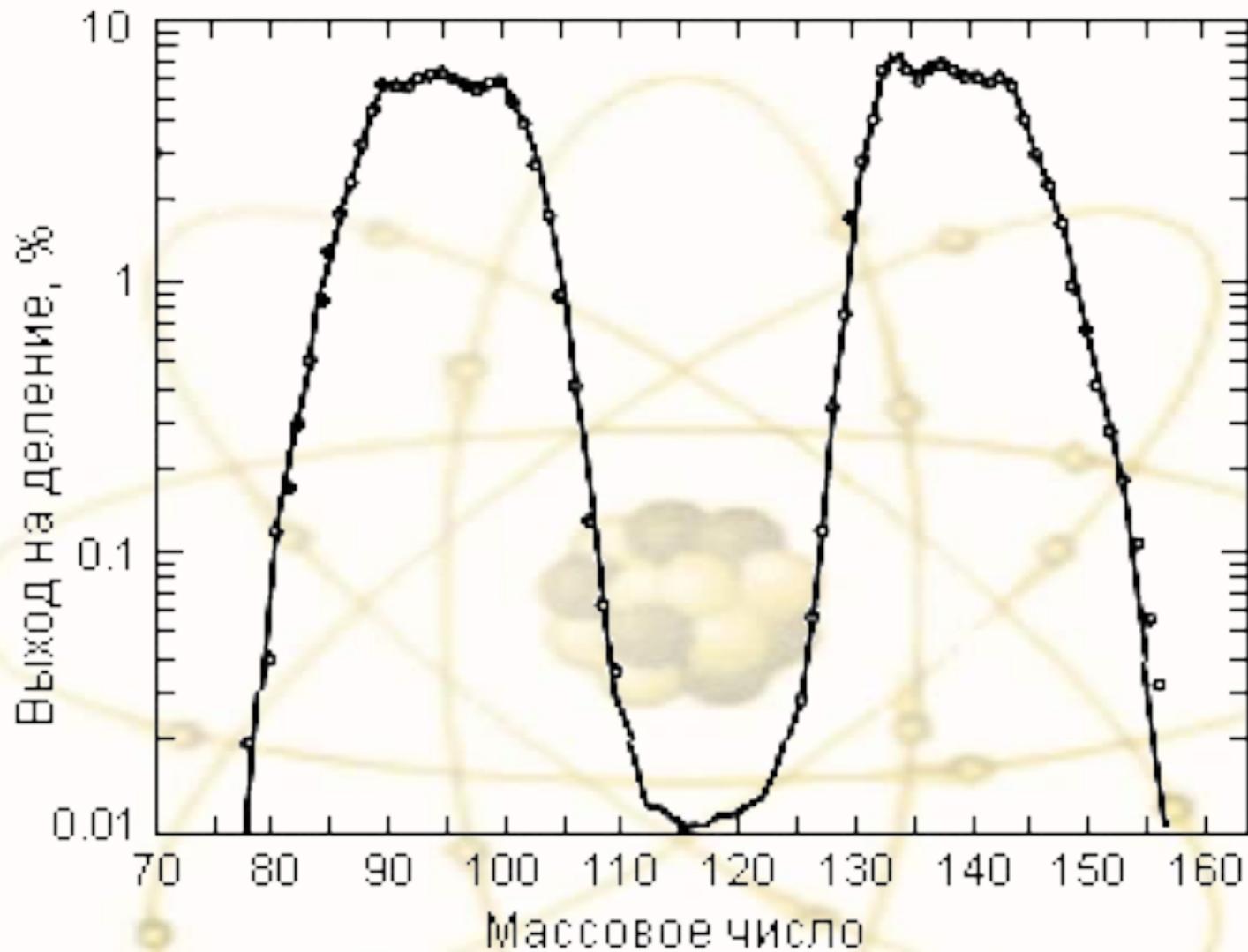
$$Z^2 / A > 49$$

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, α -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}U . Наиболее вероятная комбинация массовых чисел – 95 и 139.

В результате деления высвобождается энергия ~ 200 МэВ энергии.

За один акт деления образуется **более двух нейтронов деления со средней энергией ~ 2 МэВ.**

В 1 г любого вещества содержится

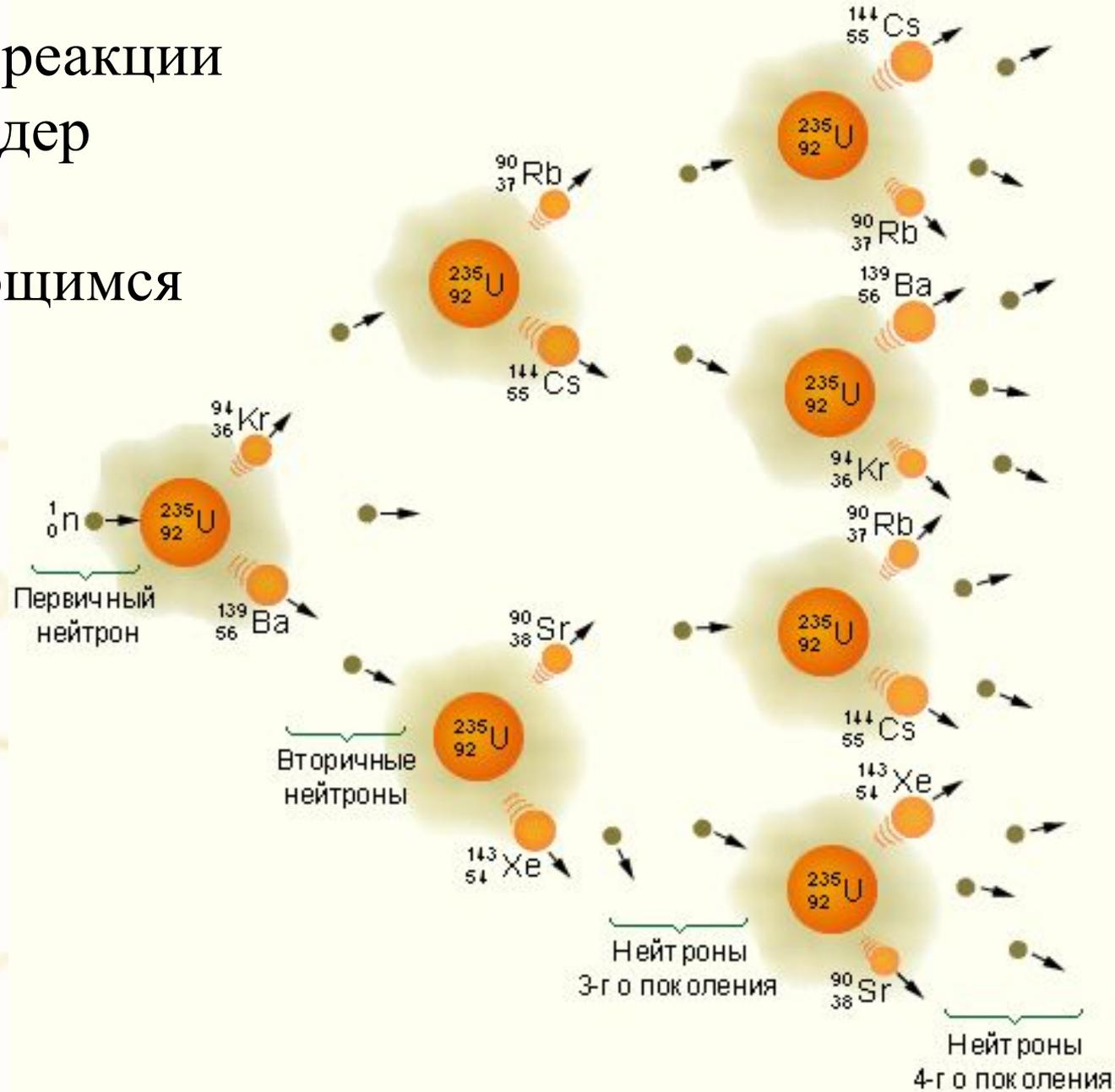
$$mc^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$$

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

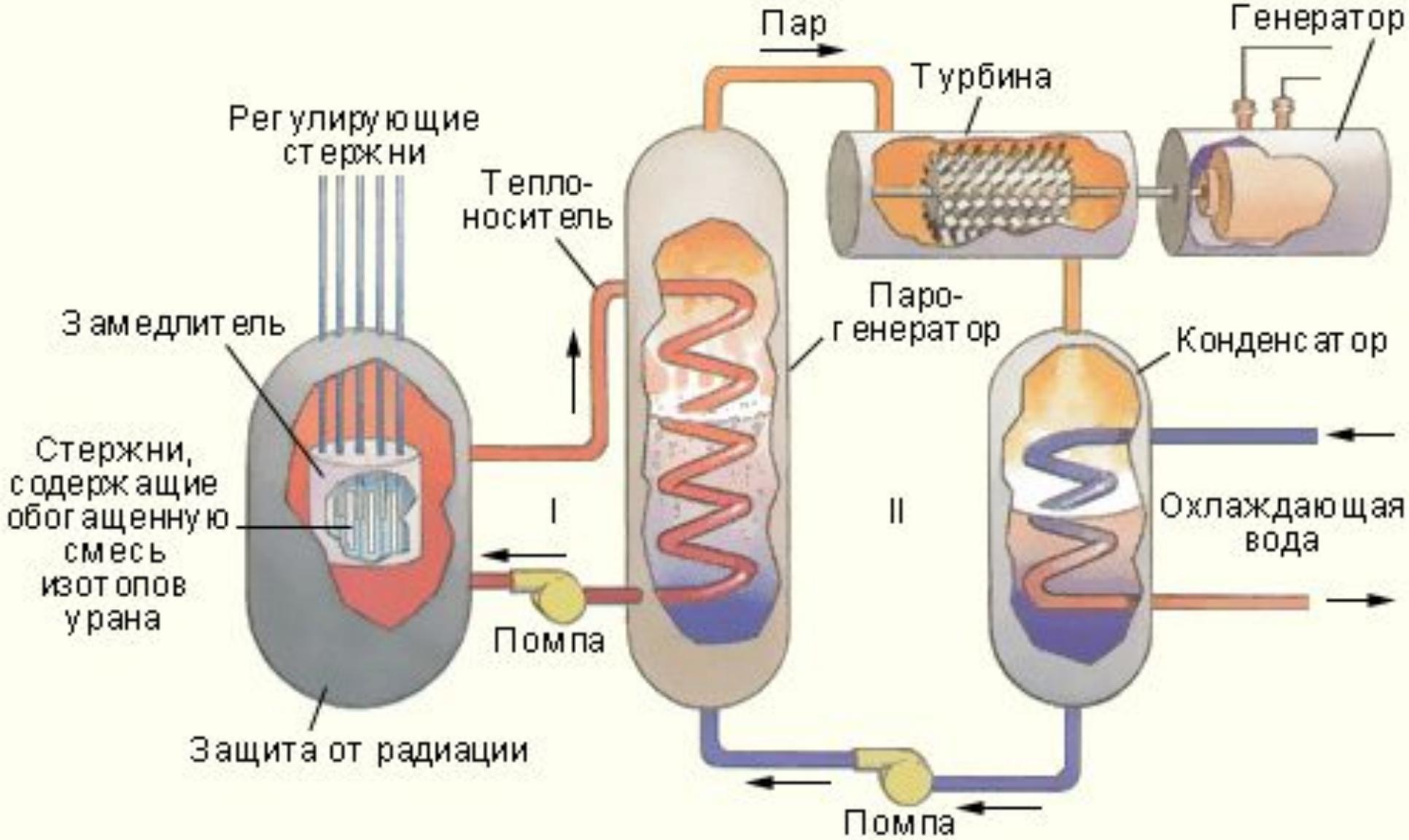
При каждом делении вылетают 2 или 3 нейтрона. Если одному из этих нейтронов удастся вызвать деление другого ядра урана, то процесс будет **самоподдерживающимся**.

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

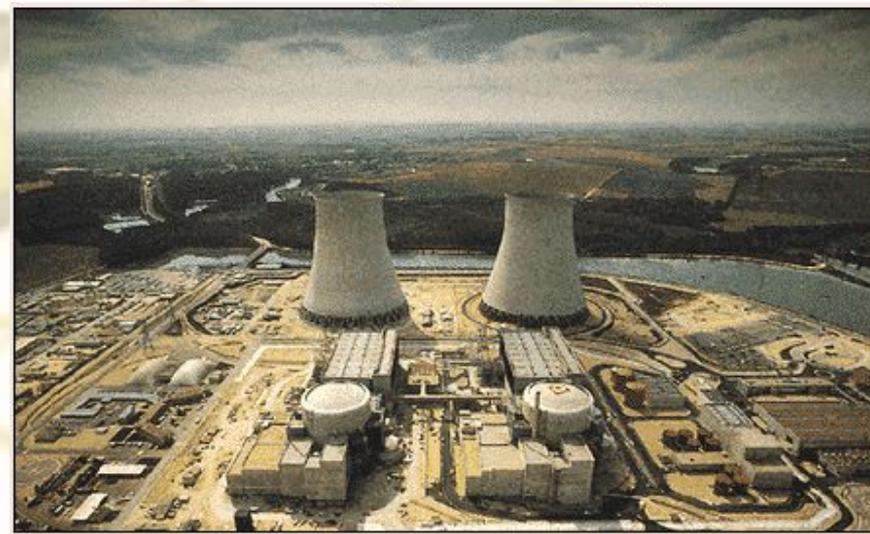
Первая такая сборка, названная ядерным реактором, была построена в 1942 г. под руководством Энрико Ферми на территории Чикагского университета в США.

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.

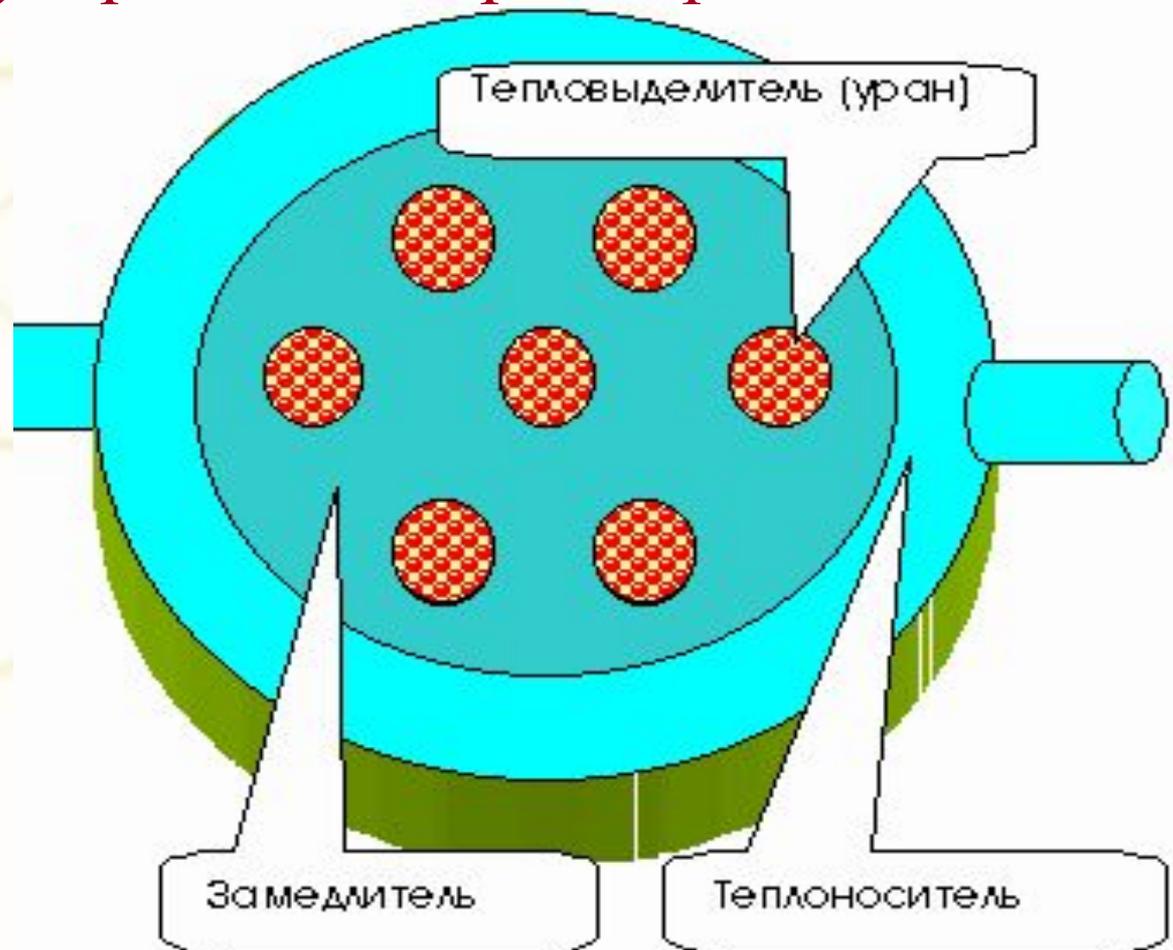
Система управления реактором состоит из набора стержней, состоящих из материала высокопоглощающего нейтроны.

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

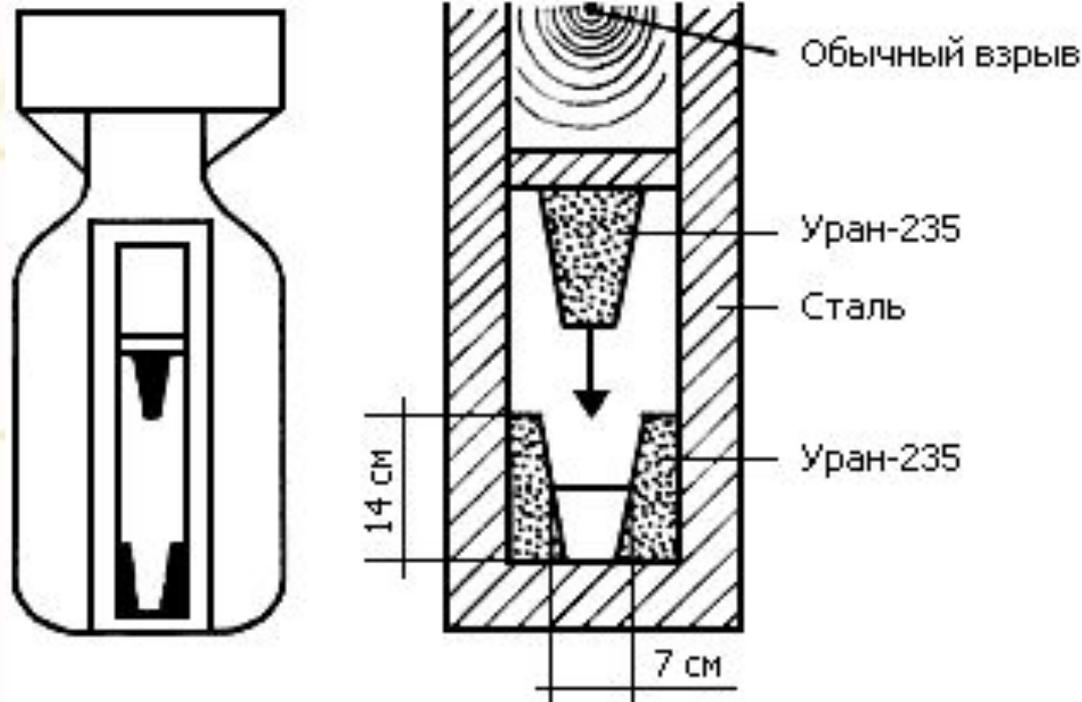
Поскольку нейтроны движутся со скоростями, превышающими 10^8 см/с, **надкритическая сборка может полностью прореагировать (или разлететься) быстрее, чем за тысячную долю секунды**.

Такое устройство называется **атомной бомбой**

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

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

Необходимая для взрыва критическая масса ^{235}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.

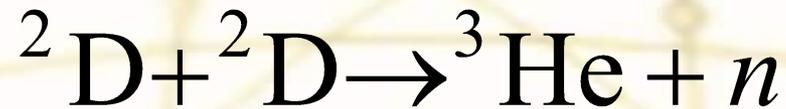
Для получения управляемой термоядерной энергии и для инициирования термоядерного взрыва водородной бомбы необходима температура около $5 \cdot 10^7$ К.

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

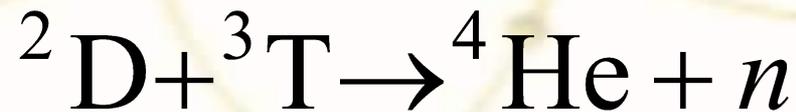
Мгновенные температуры, развивающиеся при взрыве атомной бомбы, оказываются достаточно высокими, чтобы поджечь термоядерное горючее.

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}U .

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

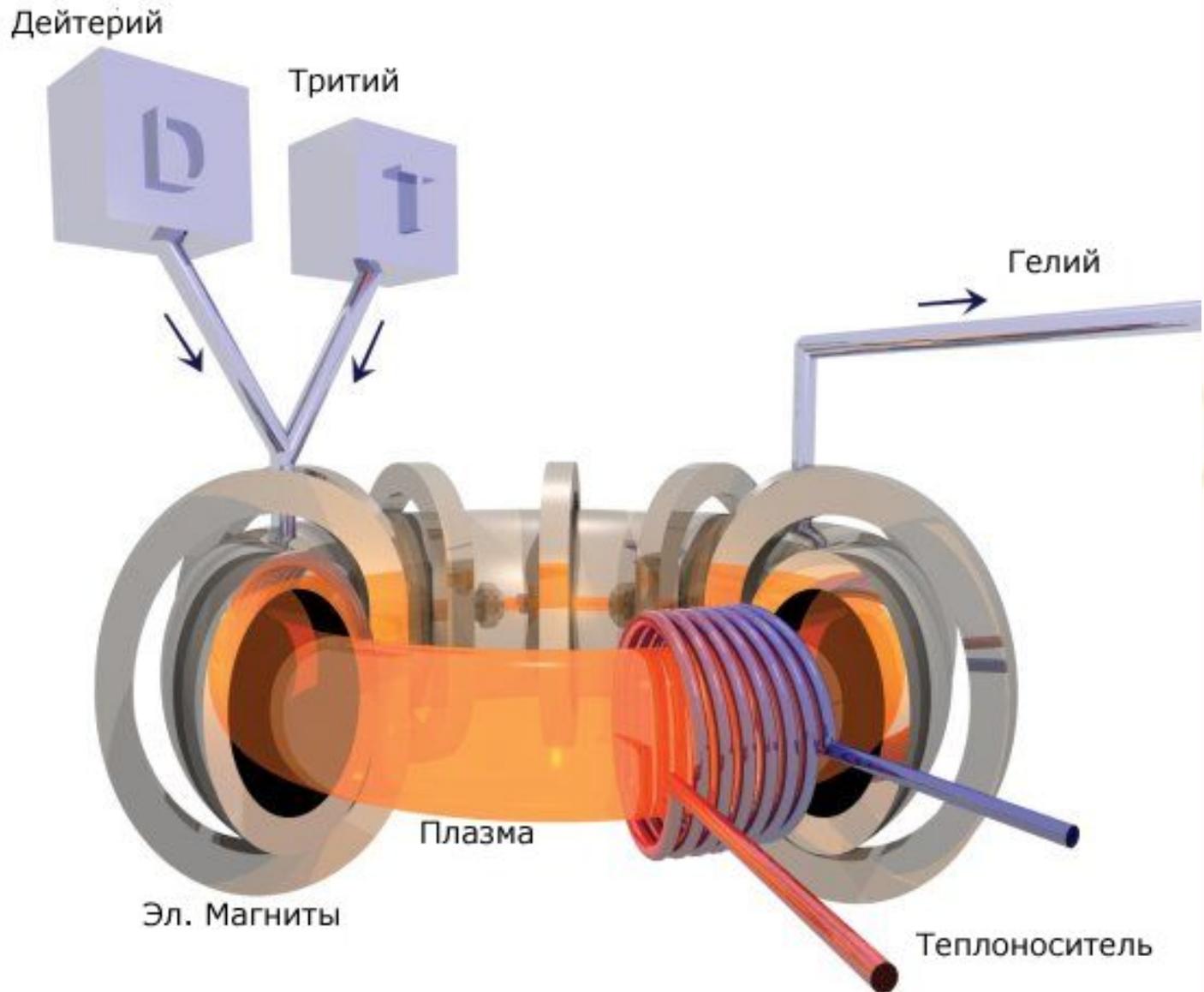
Управляемый синтез

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

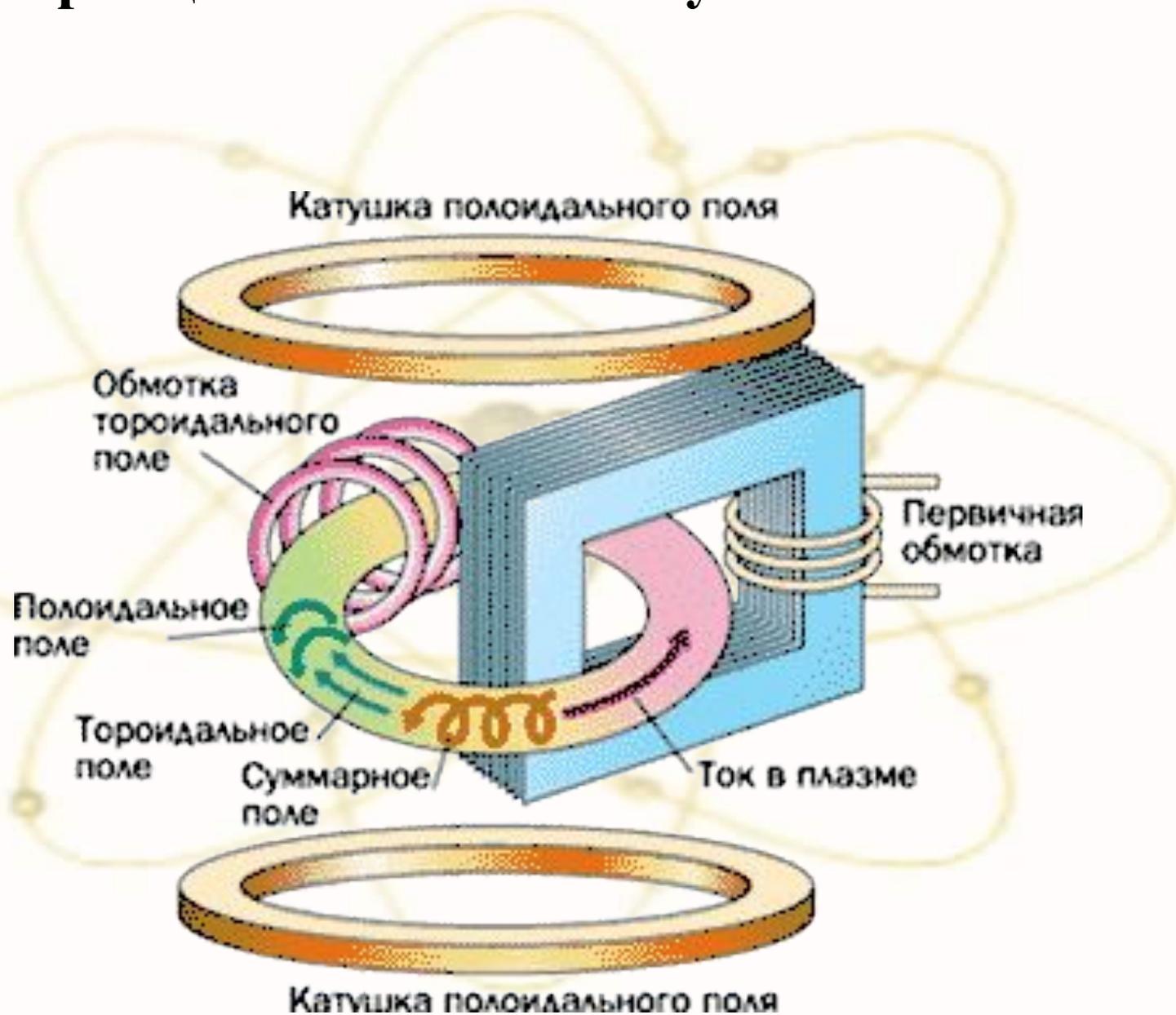
Необходимо найти способы создания и поддержания температур во много миллионов градусов.

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 α - 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 β – частицы и γ – 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 β – частицы и γ – излучение. Входит в состав отработанного топливного элемента реактора. Выделяется при ох хранения. Защита – изолированное помещение.	10 лет
Стронций -90	Металл, испускающий β – частицы. Основной продукт деления в радиоактивных отходах. Накапливается в костных тканях человека.	29 лет
Цезий-137	Металл, испускающий β – частицы и γ – излучение. Накапливается в клетках мышечной ткани.	30 лет
Радий-226	Тяжелый газ, испускающий α – частицы, β – частицы и γ – излучение. Защита – укрытия, убежища	1600 лет
Углерод-14	Испускает β – частицы. Естественный природный изотоп углерода. Используется при определении возраста материала.	5500 лет
Плутоний-239	Испускает α – частицы. Содержится в радиоактивных отходах. Защита – качественное захоронение радиоактивных отходов.	24000 лет
Калий-40	Испускает β – частицы и γ – 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.