

## **Элементы ядерной физики. Общие сведения о радиоактивном излучении.**

1.Строение ядра, его основные характеристики.

2. Ядерные силы.

3. Альфа-, бета- и гамма–распад. Характеристики альфа-, бета- и гамма - излучения.

4. Биологическое действие ионизирующего излучения.5.  
Ядерные реакции. Ядерный реактор

5. Виды распада ядер. Закон радиоактивного распада

5. Взаимодействие излучения с веществом.

**К 20-м годам ХХ** - атомы и атомные ядра,  
имеют сложную структуру.

**К настоящему времени** - атомные ядра  
различных элементов состоят из 2х частиц,  
протонов и нейтронов.

- **Протон** – ядро атома водорода.

$$e_p \sim 1,6^{-19} \text{ Кл.}$$

Масса покоя:

$$m_p \sim 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 m_e = 1,007 \text{ а. е. м.}$$

Иногда - в значениях энергии ( $E = mc^2$ );

$$m_p \sim 938,27 \text{ МэВ.}$$

Спин протона:  $\frac{1}{2}$  (фермион)

## Нейтрон - Дж.Чедвик (1932 г.)

Масса покоя:

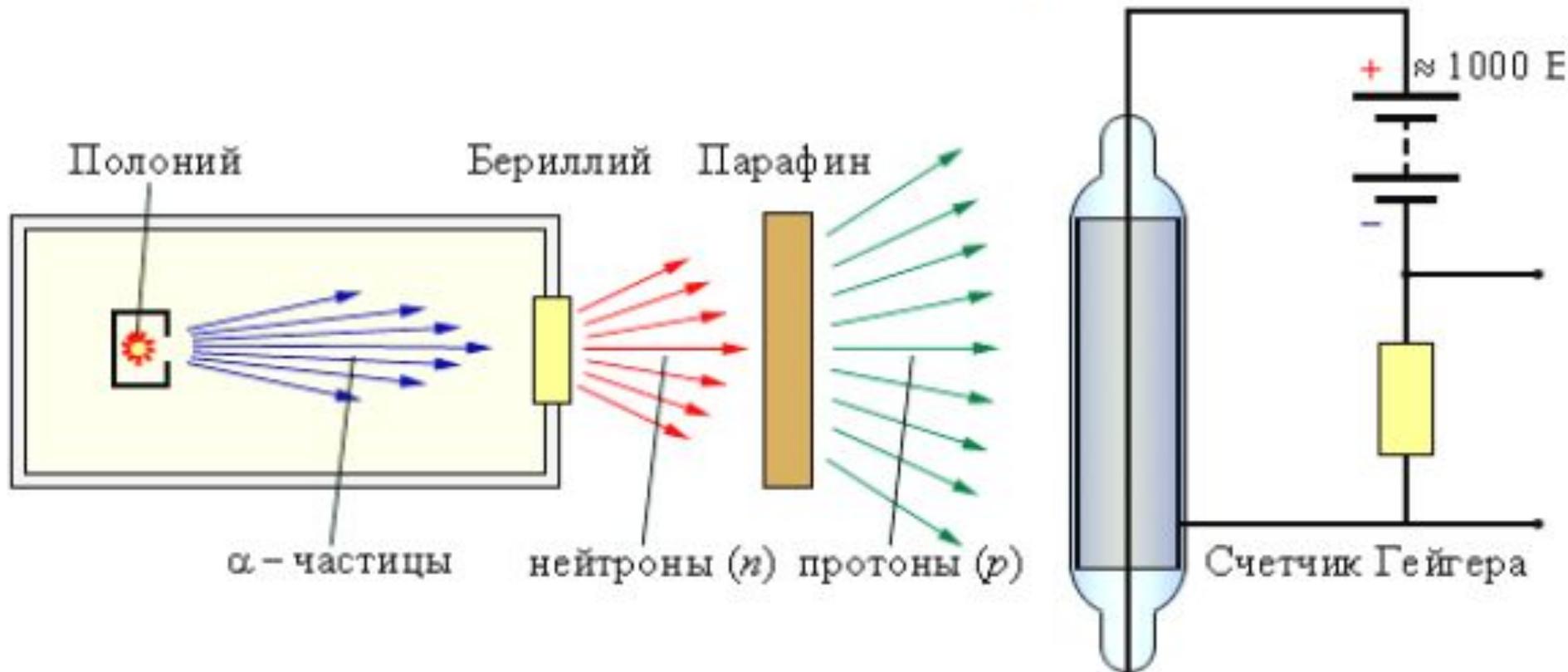
$$m_n \sim 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008 \text{ а. е. м} = \\ = 939,56 \text{ МэВ. } (> m_p = 938,27 \text{ МэВ})$$

Не имеет заряда.

Спин нейтрона:  $\frac{1}{2}$  (фермион) – не смотря на отсутствие заряда, так как в состав входят заряженные кварки.

**Протоны и нейтроны - нуклоны.**

# Опыт Дж. Чедвика



Сильное проникающее излучение ( нейтроны ) возникает при бомбардировке **Be**  $\alpha$ -частицами, испускаемыми радиоактивным **Po** (полоний).

## Для характеристики атомных ядер ....

- **$Z$**  - зарядовое число или атомный номер,  
число протонов в ядре,  
 **$Ze$**  – заряд ядра,  
 **$N$**  - число нейтронов,  
 **$A = Z + N$**  - массовое число,  
 ${}^A_Z X$  - ядра химических элементов,  
 **$X$**  – химический символ элемента

В настоящее время известны ядра:

$$Z = 1 - 118$$

## Описание атомного ядра

Обозначение	Определение
$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$	<p>Пример:</p> $\begin{matrix} 16 \\ 8 \end{matrix} O$ <p>Массовое число (16 нуклонов)</p> <p>Зарядовое число (8 протонов)</p> <p>Число нейтронов <math>N = A - Z</math>. В ядре 8 нейтронов</p>

**ИЗОТОПЫ** - ядра одного хим. эл., отличаются числом нейтронов  $N$ .

У них  $A = Z + N$  – разное.

Хим. элемент в природе - **смесь изотопов.**

Н-р, **у водорода 3 изотопа:**

${}^1\text{H}_1$  – протий, обычный водород, 1 протон,

${}^2\text{H}_1$  – дейтерий, 1 протон + 1 нейтрон,

${}^3\text{H}_1$  – тритий, 1 протон + 2 нейтрона

Углерод – **6** изотопов,

Кислород-**3** изотопа

**Изобары** - одинаковые  $A$ , но разные  $Z$ ,

**Изотоны** - одинаковые  $N$ , но разные  $Z$  и  $A$ .

Изотопы, изобары и изотоны - **нуклиды**.

Нуклиды	Примеры
Изотопы	${}_{5}^{10}B$ ${}_{5}^{11}B$
Изобары	${}_{82}^{210}Pb$ ${}_{83}^{210}Bi$
Изотоны	${}_{7}^{14}N$ ${}_{8}^{15}O$

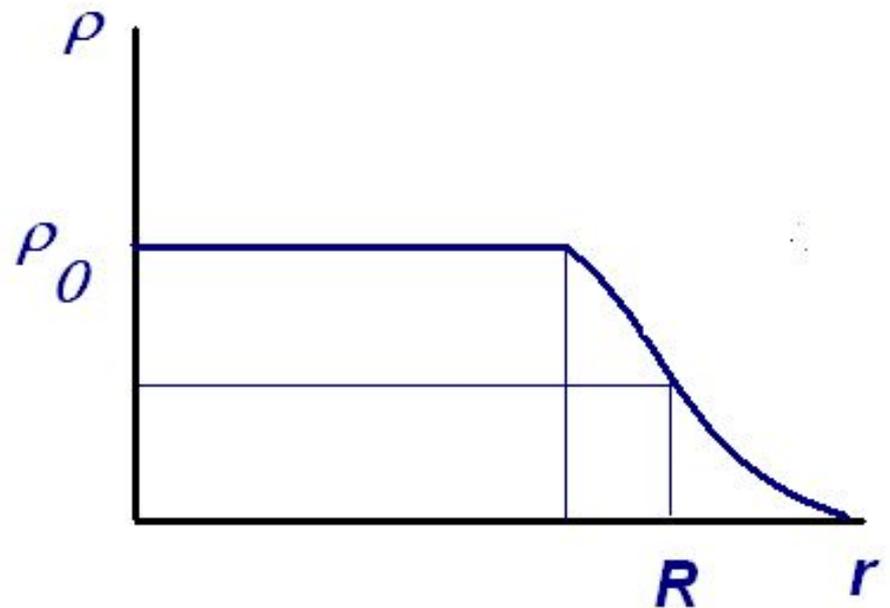
**2300** ядер с разными  $Z$ ,  $A$  и другими числами

**Радиусы ядер хорошо аппроксимируются  
выражением.....**

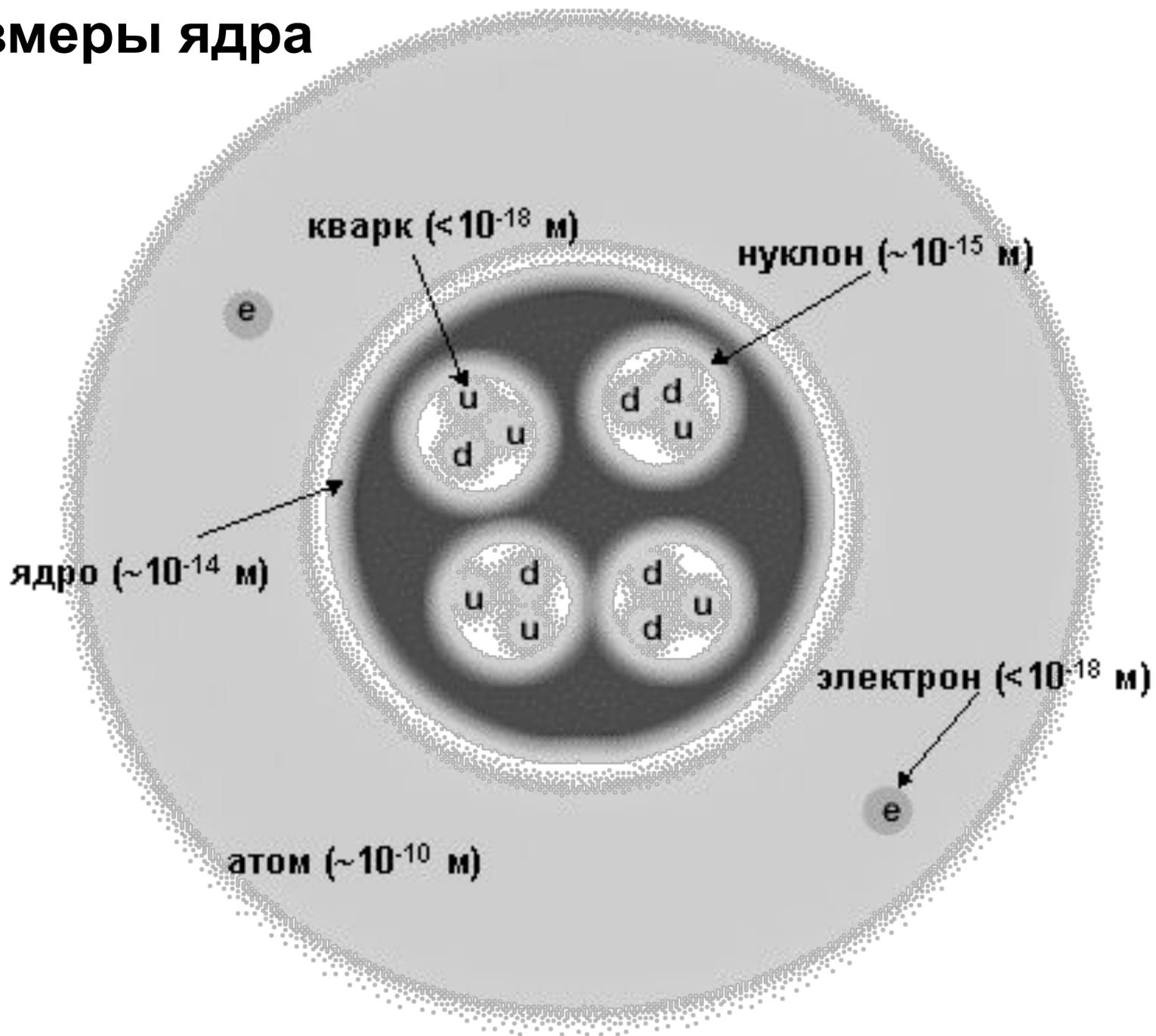
$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$R_0 = (1,3 - 1,7)10^{-15} \text{ м}$$

**Плотность числа  
нуклонов постоянна во  
внутренней области ядра  
и уменьшается до нуля  
вблизи его поверхности.**



# Размеры ядра



# Энергия связи и масса ядер

- Масса ядра меньше суммы масс покоя составляющих нуклонов ( $m_{\text{я}}$  - масса ядра)

$$m_{\text{я}} < Zm_p + (A - Z)m_n$$

$m_p$  и  $m_n$  - массы покоя протона и нейтрона

**Энергия связи ядра** - минимальная энергия, необходимая для того, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны (протоны и нейтроны).

$$E_{\text{св}} = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}})c^2$$



$\Delta m$  - дефект масс

(7)

Энергия, выделяющаяся при образовании ядра

**Удельная энергия связи... на один нуклон:**

$$E_{св}^{уд} = \frac{E_{св}}{A} = \frac{\Delta m}{A} c^2 \quad (8)$$

**Для большинства ядер  $\approx 8$  МэВ**

**Для разрыва химической связи - в  $10^6$  раз меньше.**

**Наибольшая для тяжелых ядер  $m > 50$ .**

Если ядро имеет наименьшую возможную энергию

$$-W_{min} = -W_{CB}$$

ОНО - В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ.

Если ядро имеет энергию

$$W > W_{min},$$

ОНО - В ВОЗБУЖДЕННОМ СОСТОЯНИИ.

При  $W = 0$

– расщепление ядра на составляющие его нуклоны.

Аналогично энергии связи электрона в атоме!

# Ядерные силы (ЯС)

Протоны и нейтроны связаны в ядре **ядерными силами**.



Большая плотность ядерного вещества  
( $\sim 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>).

**В ядре реализовано** самое интенсивное из всех видов –  
т.н. **сильное взаимодействие**.

ЯС притяжения между нуклонами  
в сотни раз больше  
электромагнитных сил отталкивания (протоны в ядре).

# ЯС:

- 1) силы притяжения;
- 2) короткодействующие, радиус действия  $\sim 10^{-15}$  м;  
на меньших расстояниях - отталкивание;
- 3) не зависят от заряда, одинаковы между двумя любыми нуклонами ( $n - p, p - p, n - n$ ), имеют незлектрическую природу;
- 4). свойственно насыщение (каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших нуклонов).

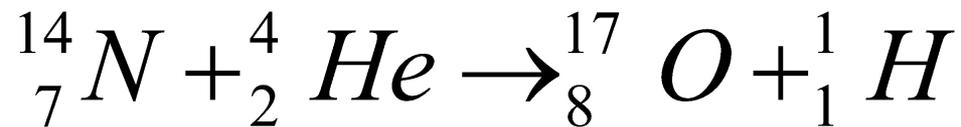
Полное насыщение ядерных сил достигается у  
 $\alpha$  – частицы

**5) зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов.**

**6) не являются центральными.**

# Ядерные реакции (ЯР)

- Ядерная реакция - превращение атомных ядер при взаимодействии с протонами, нейтронами,  $\alpha$ -частицами, ионами и  $\gamma$ -квантами, или друг с другом.  
Впервые - Э. Резерфорд, при прохождении  $\alpha$ -частиц через газ азот.

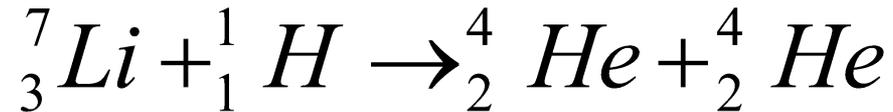


${}_{2}^{4}\text{He}$  –  $\alpha$  – частица

${}_{1}^{1}\text{H}$  – протий, протон

В результате ЯР - новые радиоактивные изотопы, в том числе, которых нет в естественных условиях

Первая **ЯР** (1932 г.) - при бомбардировке протонами большой энергии, полученных на ускорителе:



Наиболее интересны для практики – ЯР при взаимодействии ядер с нейтронами.

(лишены заряда, свободно проникают в атомные ядра и вызывают их превращения).

Э. Ферми : ЯР вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами движущимися с тепловыми скоростями.

**В любой ядерной реакции выполняются: законы сохранения :**

**1) электрических зарядов и массовых чисел:**

**Равны до и после реакций**

**2) энергии,**

**3) импульса,**

**4) момента импульса.**

Важный параметр ЯР – **энергетический выход ЯР**:  
разность суммы масс покоя продуктов до реакции  
( $m$ ) и после нее ( $m'$ ):

$$\Delta Q = \left( \sum m - \sum m' \right) c^2 = \Delta m c^2 \quad (1)$$

ЯР могут быть:

$$\Delta Q < 0$$

**эндотермические** (с поглощением энергии):  
 $\Delta m < 0$

$$\Delta Q > 0$$

**экзотермические** (с выделением энергии),  
 $\Delta m > 0$

Для понимания!!! ..... **Полная энергия в ЯР сохраняется!**

$$E_0 + K = E'_0 + K'$$

$E_0$  и  $E'_0$ ,  $K$  и  $K'$  — энергии покоя и кинетические энергии продуктов до и после **ЯР**.

Убыль суммарной энергии покоя = приращению суммарной кинетической энергии и наоборот.

Это и есть  $\Delta Q$ :

$$E_0 - E'_0 = K' - K = \Delta Q$$

ЯР с  $Q > 0$  - с выделением энергии, кинетической),  **$K' > K$**

ЯР с  $Q < 0$  - с поглощением..... ,  **$K' < K$**

# Порог ядерной реакции

Эндотермические (с поглощением энергии) ЯР возможны при ударе ядра частицей с пороговой кинетической энергией

(с меньшей ЯР невозможны):

(1)

$$E_{\text{пороговая}} = \frac{m_{\text{я}} + m}{m_{\text{я}}} |\Delta Q| \quad (2)$$

$m_{\text{я}}$  – ядро – мишень

$m$  – налетающая (ядро, частица,  $\gamma$  – квант)

# Эффективное сечение $\sigma$ ЯР.

$\sigma$  – характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдёт ЯР

$$[\sigma] - (1\text{барн} = 10^{-28} \text{ м}^2).$$

$\sigma$  интерпретируется как площадь сечения ядра  $X$ , попадая в которую налетающая частица вызывает ЯР.

**Возможны два принципиально различных способа освобождения ядерной энергии:**

- 1) Реакция деления ядер тяжелых элементов**
- 2) Реакция синтеза ядер легких элементов  
(термоядерный синтез)**

**Реакция деления тяжелых ядер** - нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс.

В 1939 г. О. Ганом и Ф. Штрассманом было открыто деление ядер урана ( $^{235}_{92}\text{U}$  - сейчас основной интерес для энергетики)



Тепловой нейтрон с энергией  $\sim 0,1$  эВ освобождает энергию  
 $\Delta Q \sim 200$  МэВ  $> 0$

Реакция в общем виде...



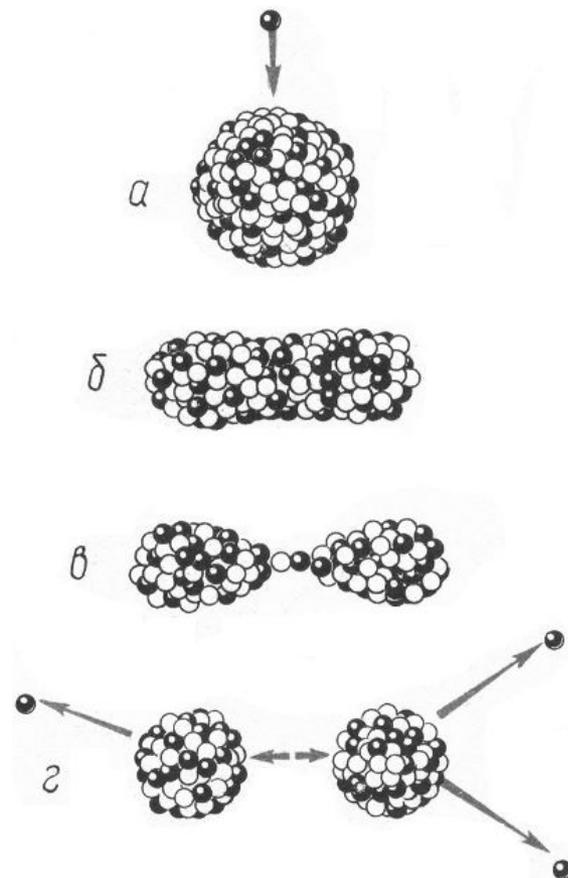
$N = 2, 3;$

До 100 изотопов в ходе реакции...

# Объяснение в капельной модели..

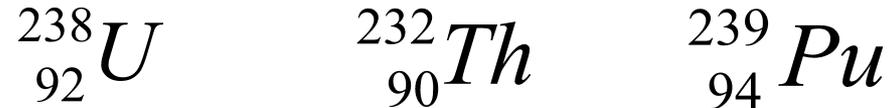
- Избыточная энергия ( $>$  энергии активации) при поглощении нейтрона ядром переводит его в возбужденное состояние  $\rightarrow$  движение нуклонов  $\rightarrow$  деформация ядра  $\rightarrow$  ослабление ядерных сил  $\rightarrow$  деление с нейтронным осколком.

Если изб. энергия  $<$  эн. актив.  $\rightarrow$   
ядро в исходное состояние  
испустив  $\gamma$  – квант

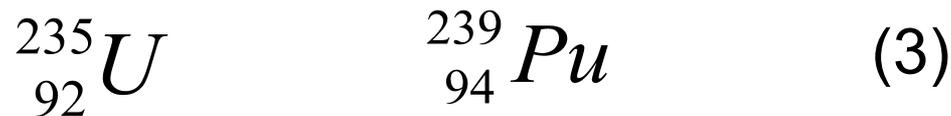


В процессе деления ядро изменяет форму : шар, эллипсоид, гантель, два грушевидных осколка, два сферических осколка.

Нейтроны с энергией  $\sim 1$  МэВ и выше, вызывают деление ядер урана, тория, плутония и др:



Эти ядра делятся нейтронами любых энергий, но особенно эффективно медленными нейтронами:



Уран в природе - в виде двух изотопов:

${}^{238}U$  (99,3 %) и  ${}^{235}U$  (0,7 %).

Ядерное сырье -  ${}^{235}U$ .

Необходим процесс обогащения урана изотопом  ${}^{235}U$ .



- Продукты деления ядра  ${}^{235}\text{U}$  нестабильны: в них содержится избыточное число нейтронов.

При делении ядра  ${}^{235}\text{U}$  ..... + 2 или 3 нейтрона.  
Они могут попасть в другие ядра  ${}^{235}\text{U}$  - вызывают их деление.

Появятся 4 - 9 нейтронов - новые распады ядер  ${}^{235}\text{U}$  и т. д.

Лавинообразный процесс деления ядер - **цепная реакция.**

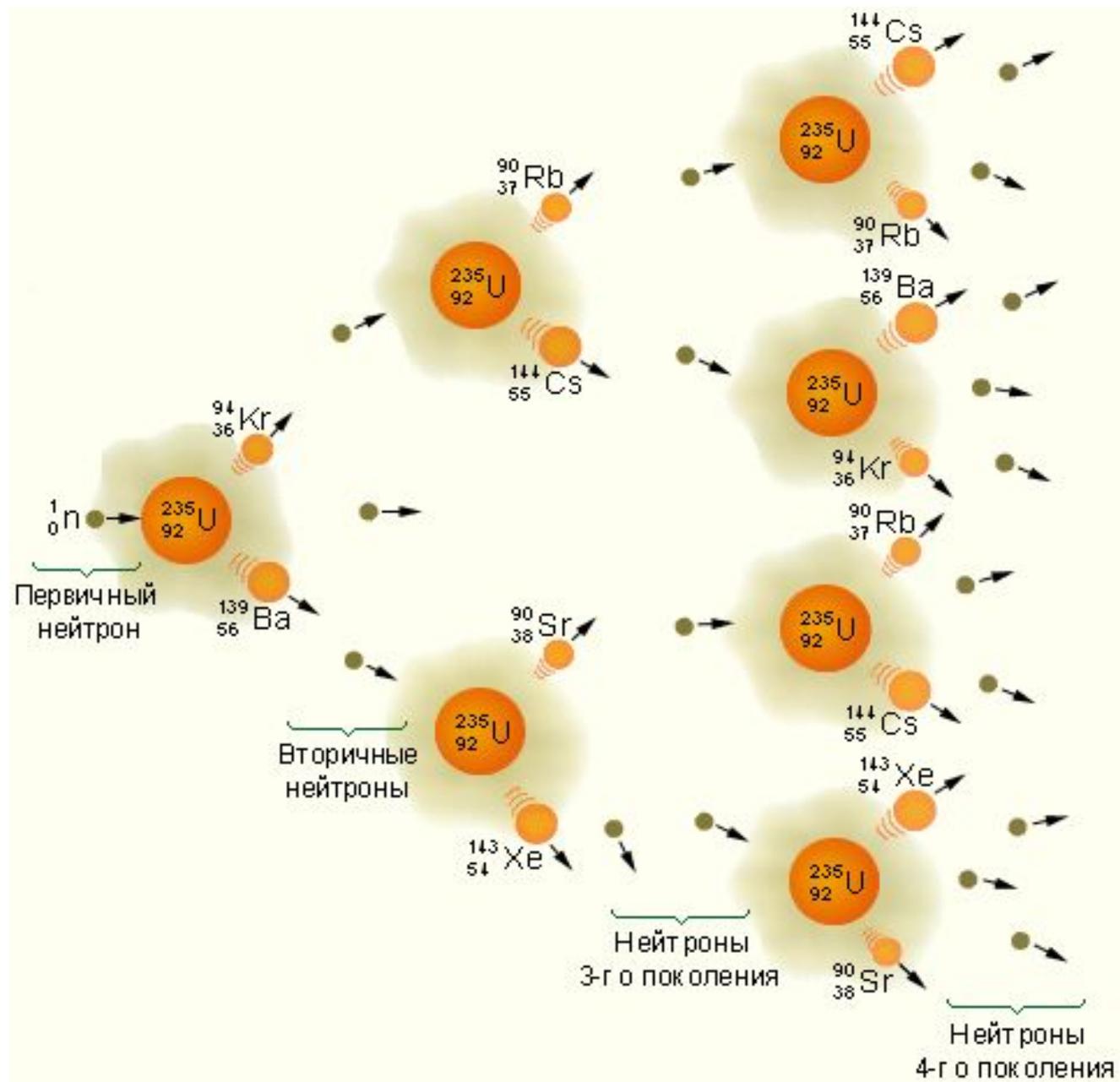
Для **ЦР** - коэффициент размножения нейтронов д.б.  **$k > 1$**

ЦР в уране с повышенным содержанием  $^{235}\text{U}$  развивается, когда масса урана превосходит **критическую массу**.

В небольших кусках  $\text{U}$  большинство нейтронов, не попав ни в одно ядро, вылетают наружу.

Для чистого  $^{235}\text{U}$  - 50 кг.

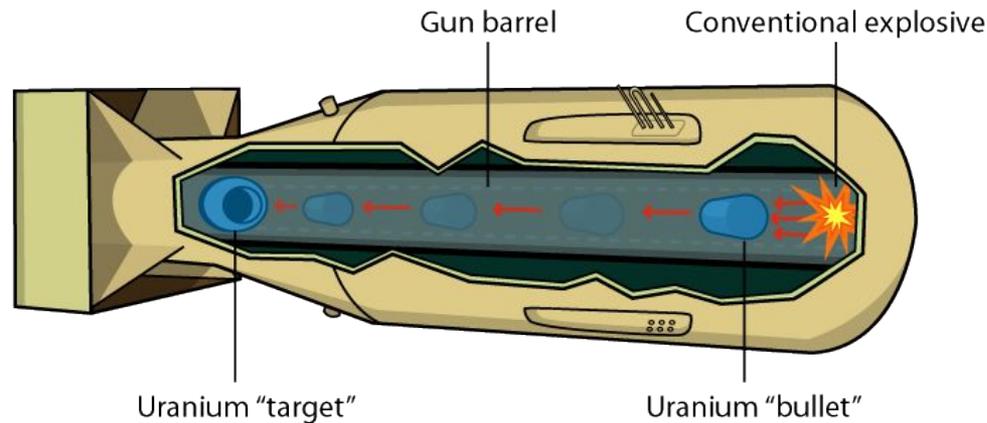
**~250 г** - применение замедлителей нейтронов (н-р, тяжелая вода  $\text{D}_2\text{O}$ , графит) и оболочки из  $\text{Be}$ , которая отражает нейтроны.



ЦР: **управляемые и неуправляемые.**

Взрыв атомной бомбы - неуправляемая реакция.

Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$  (плутоний) делятся на две удаленные части с массами ниже критических. С помощью обычного взрыва массы сближаются



При полном делении всех ядер в 1 г  $^{235}\text{U}$ , выделяется энергия, как и при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

**Ядерный (или атомный) реактор** - устройство, в котором поддерживается управляемая ЦР.

**Это тепловая машина.**

**Выделение тепла - за счет экзотермической реакции деления ядер.**

**1 МВт мощности -  $3 \cdot 10^{16}$  актов деления ядер в секунду.**

**Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. в США под руководством Э. Ферми.**

**В СССР - в 1946 г.- под руководством И. В. Курчатова.**

**Активная зона** - основная часть реактора, в ней протекает ЦР и выделяется энергия. Объем АЗ - от **0,0n** литра до **n10 м<sup>3</sup>** (в больших тепловых реакторах).

---

**Активная зона реактора на  
тепловых нейтронах**

(с энергией 0,0n эВ) состоит из:

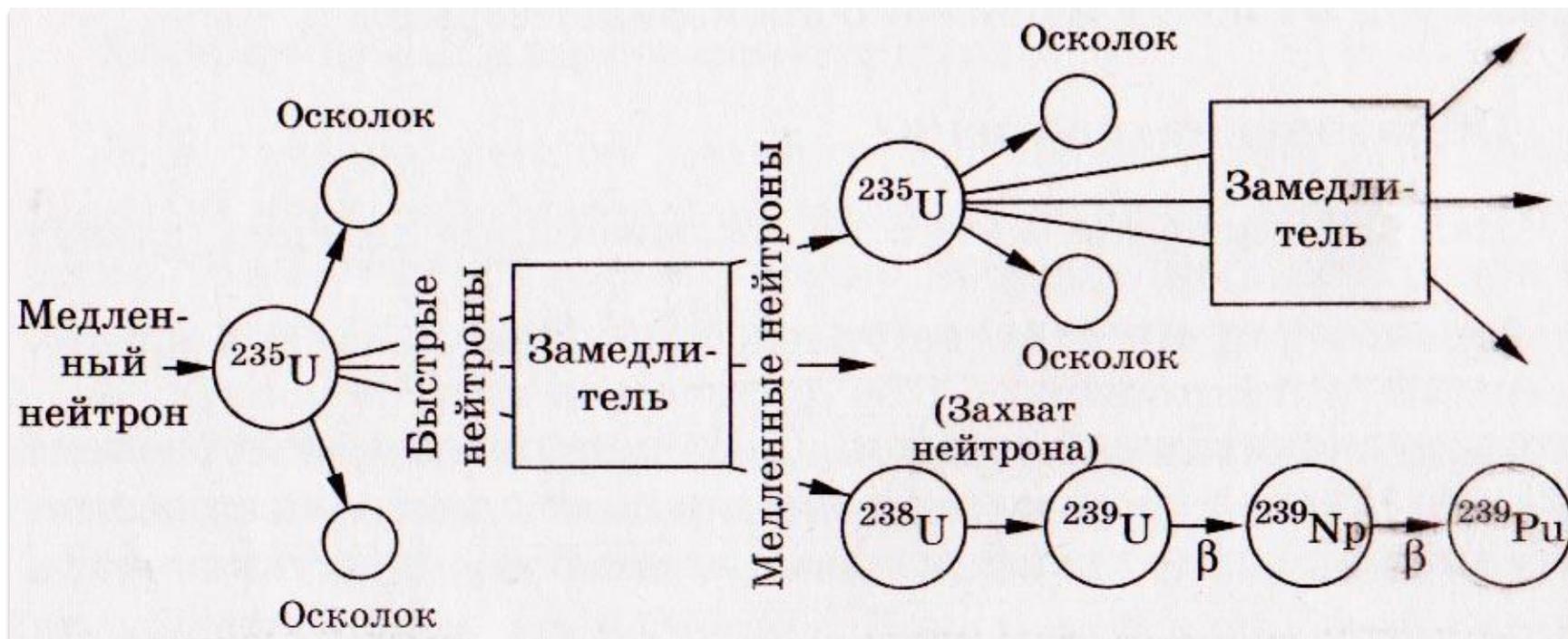
ядерного топлива (**<sup>235</sup>U**, даже слабо обогащ. **U**),

замедлителя (вода, графит, **Be**),

теплоносителя (н-р, вода, ..... для отвода тепла на парогенератор.... пар.....на турбину....электроэнергия),

конструкционных материалов с малым сечением захвата нейтронов (**Al, Mg, Zr** и др).

**Замедлитель: для снижения энергии вторичных и т.д. быстрых нейтронов до тепловых, т. к. именно они эффективно продолжают взаимодействие с  $^{235}\text{U}$ .**



**Управление реактором - при помощи регулирующих стержней, содержащих *Cd* или *B*.  
(*k*- коэффициент размножения нейтронов)**

При выдвинутых из АЗ стержнях  $k > 1$ .

При полностью вдвинутых стержнях  $k < 1$ .

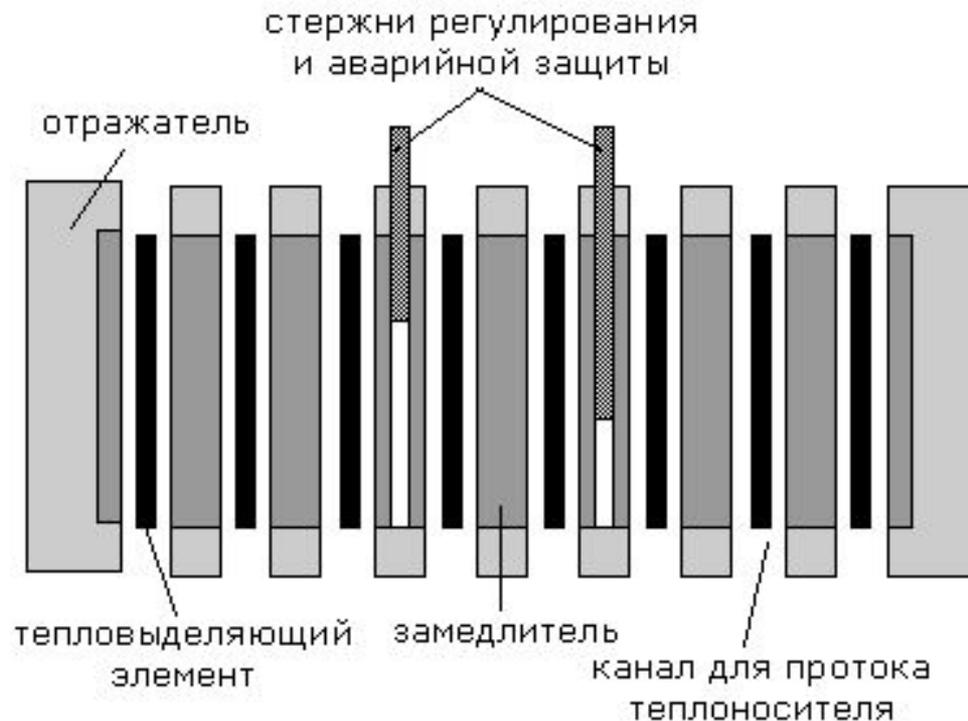
Вдвигая стержни внутрь АЗ можно в любой момент времени приостановить развитие ЦР.

# Модели ядерных реакторов :

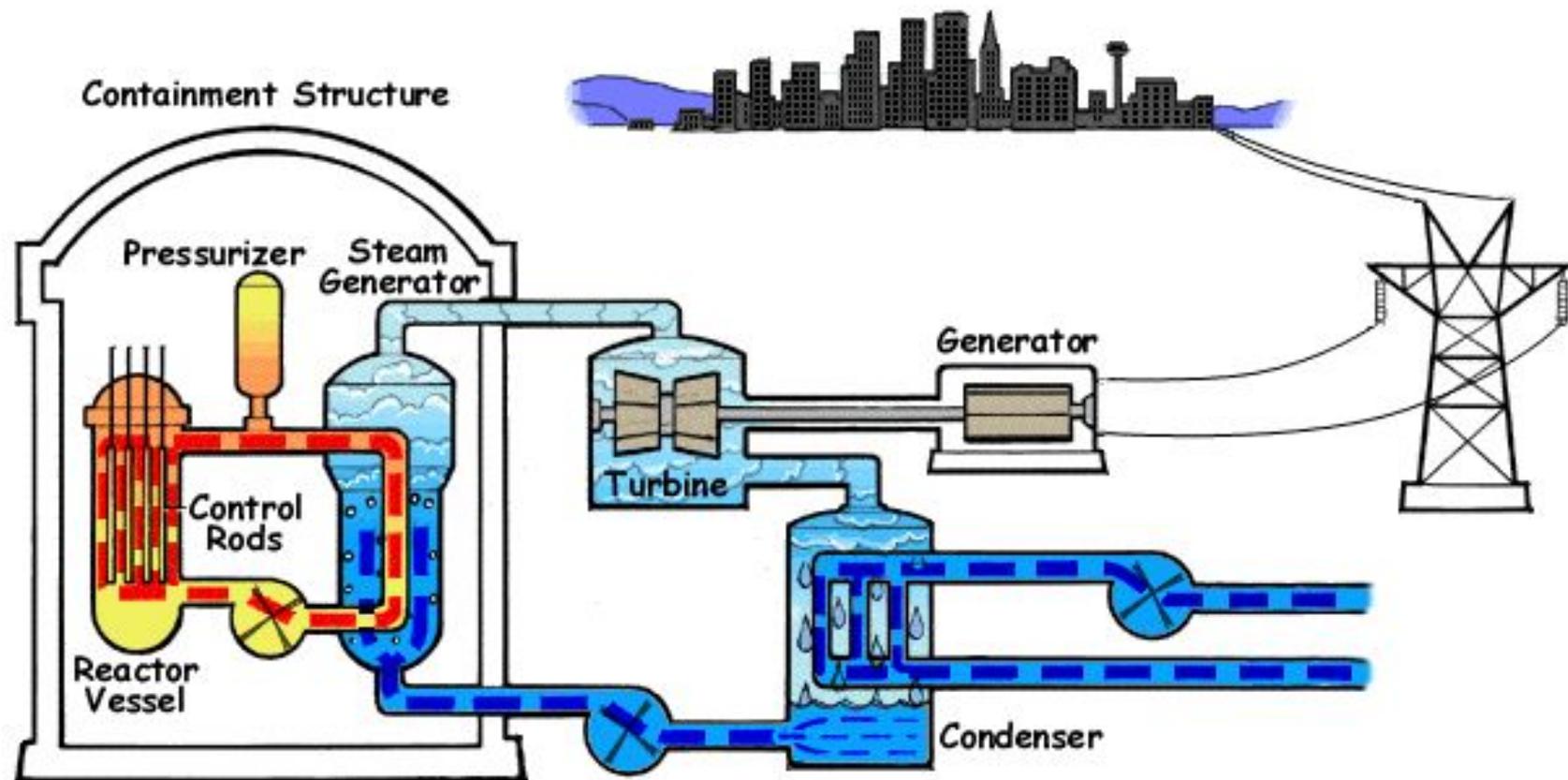
-

**Гомогенные реакторы** (в АЗ - смесь ядерного топлива и замедлителя).

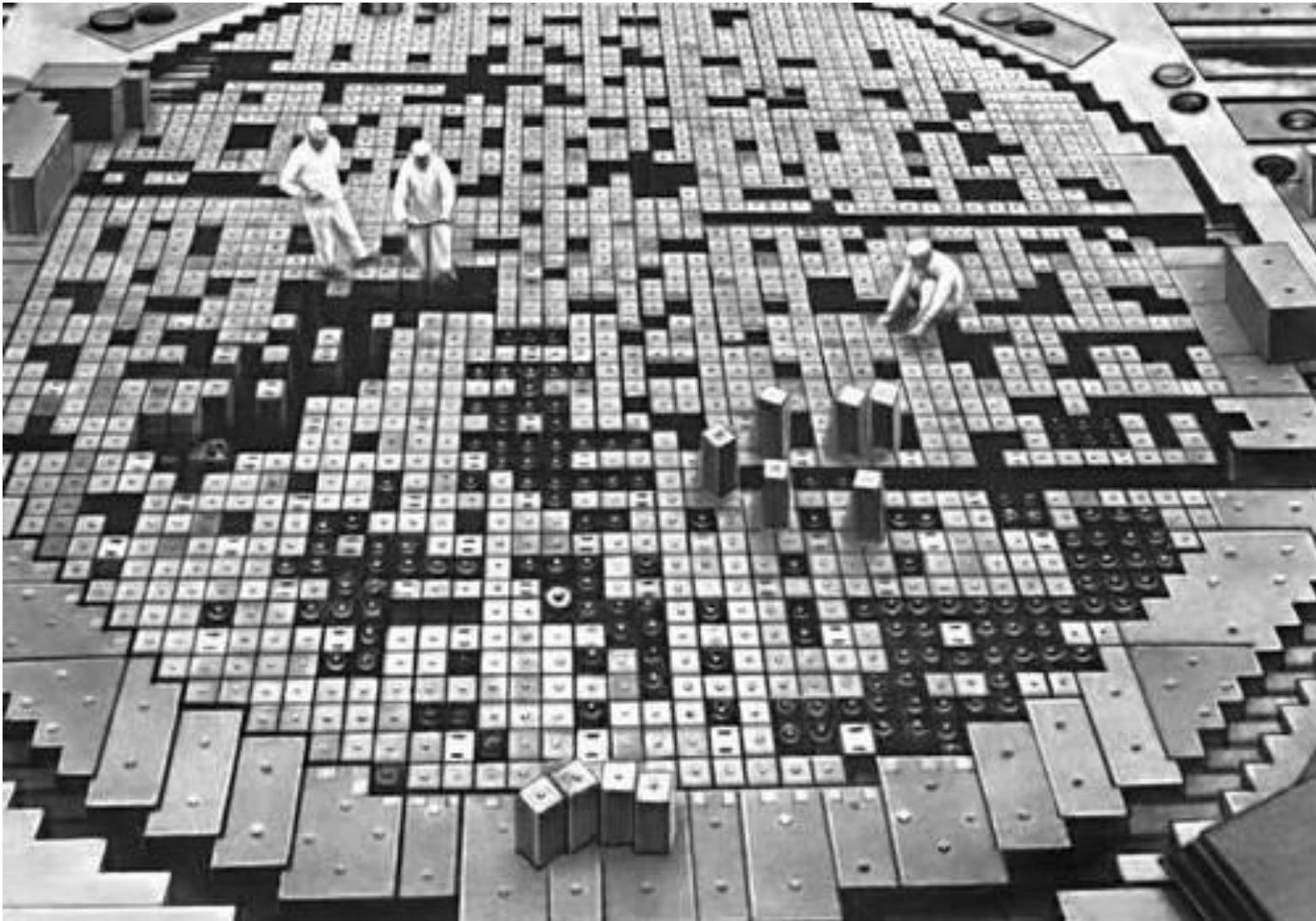
**Гетерогенные реакторы** – в АЗ замедлитель, в который помещаются кассеты с ядерным топливом - тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Энергия выделяется в ТВЭЛах.



# Реакторы типа **ВВРд** (PWR)- **водоводяной** реактор (строится в Беларуси)



# Сборка гетерогенного реактора



В гетерогенном реакторе ядерное топливо распределено в активной зоне дискретно в виде блоков, между которыми находится замедлитель нейтронов



# **ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ**

- 1. Радиоактивность атомных ядер.**
- 2. Виды распада ядер. Закон радиоактивного распада.**
- 3. Взаимодействие излучения с веществом.**
- 4. Дозы и биологическое действие ионизирующего излучения**

**Радиоактивность - способность нестабильных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием радиоактивного излучения.**

**Естественная радиоактивность - у существующих в природе неустойчивых изотопов.**

**Искусственная радиоактивность – у изотопов, полученных в результате ЯР.**

**Оба явления подчиняется одним и тем же законам.**

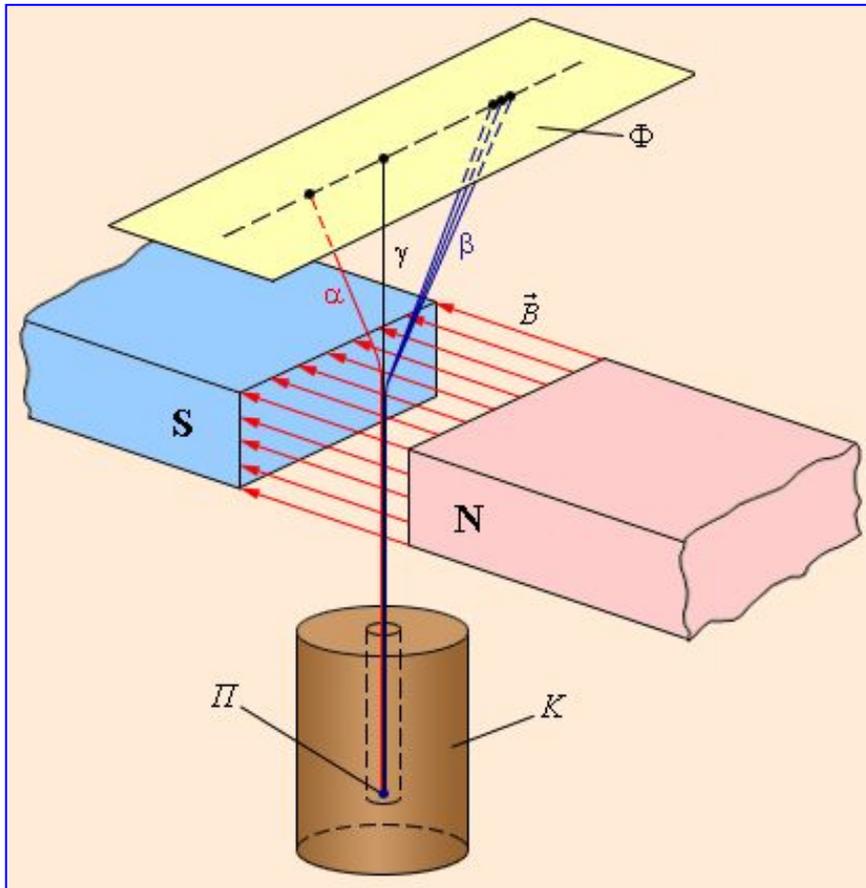
**Впервые А. Беккерель (1896 г.) обнаружил, что соли урана испускают неизвестное излучение, проникающее через непрозрачные для света преграды и вызывают почернение фотоэмульсии.**

**М. и П. Кюри (1898 г.) обнаружили радиоактивность тория и открыли 2 новых радиоактивных элемента – полоний и радий.**

**Э. Резерфорд, его ученики и др. далее исследовали природу радиоактивных излучений .....**

.....радиоактивные ядра могут испускать частицы  
трех видов: положительно и отрицательно  
заряженные и нейтральные.....

**$\alpha$ - ,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения**



**В магнитном поле:**  
 **$\alpha$  – и  $\beta$  –лучи**  
**отклоняются в**  
**противоположных**  
**направлениях, причем**  
 **$\beta$ -лучи - больше.**  
 **$\gamma$ -лучи не отклоняются.**

**К – свинцовый контейнер, П – радиоактивный препарат, Ф – фотопластинка.**

**Материнское ядро – испытывает радиоактивный распад.**

**Дочернее ядро - возникающее,**

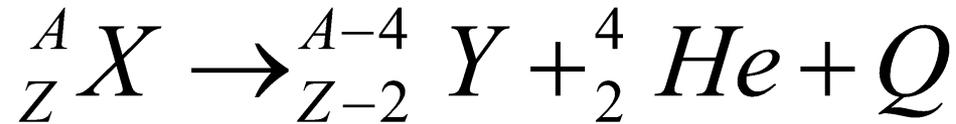
**как правило, возбужденное, его переход в основное состояние происходит с испусканием**

**$\gamma$ -фотона**

# Основные типы радиоактивности

## Альфа-распад

- Сильное проникающее излучение возникает при бомбардировке **Be**  $\alpha$ -частицами, испускаемыми радиоактивным **Pu** (полоний).



$X$  — материнское ядра,  $Y$  — дочернее,  
 $Q$  — возможная избыточная энергия

Например:



При  $\alpha$ -распаде массовое число **A** дочернего ядра уменьшается на 4, а зарядовое число **Z** - на 2

Только тяжелые ядра испускают  $\alpha$ -частицы.

Их кинетическая энергия -- **несколько МэВ** - избыток энергии покоя материнского ядра над суммой энергий покоя дочернего ядра и  $\alpha$ -частицы,

Пробег в воздухе при н.у. -- несколько см

$\alpha$ -частицы м.б с дискретными значениями энергий - ядра могут находиться, подобно атомам, в разных возбужденных состояниях.

Дочернее ядро - **в возбужденном** состоянии  $\rightarrow$  переход в **основное** состояние с испусканием  $\gamma$ -кванта

# Основной закон радиоактивного распада

- Закономерности радиоактивном распаде носят вероятностный характер и выполняются тем точнее, чем больше число радиоактивных ядер.

В теории  $\alpha$ -распада  $\rightarrow$  внутри материнского ядра может «образоваться»  $\alpha$ -частица.

«Дочернее ядро» - еще в материнском ядре.

Пусть ядра распадаются независимо друг от друга.

$\lambda$  - постоянная распада - вероятность распада ядра в единицу времени.

Смысл  $\lambda$ : из  $N$  нестабильных ядер в единицу времени распадается в среднем  $\lambda N$  ядер.

К моменту времени  $t + dt$  число радиоактивных ядер уменьшится на

$$dN = -\lambda N dt \quad (1)$$

Проинтегрируем (1), считая, что  $\lambda$  не зависит от времени.

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

Н-р, у водорода 3 изотопа:

${}^1\text{H}_1$  – протий, обычный водород, 1 протон,

${}^2\text{H}_1$  – дейтерий, 1 протон + 1 нейтрон,

${}^3\text{H}_1$  – тритий, 1 протон + 2 нейтрона

Углерод – 6 изотопов,  
Кислород – 3 изотопа

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

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$N(t)$  — число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ .

$N_0$  — число нераспавшихся при  $t = 0$ .

(2) - **Закон радиоактивного распада:** число нераспавшихся ядер убывает с течением времени по экспоненциальному закону.

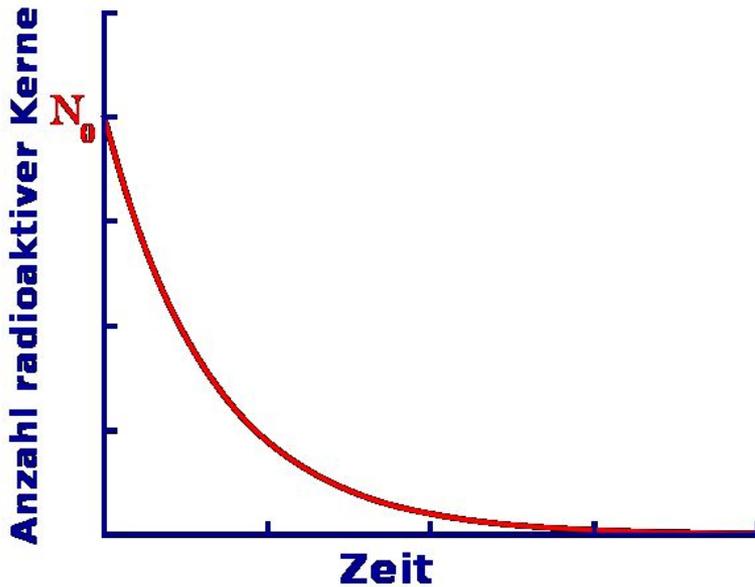
Число распавшихся ядер за время  $t$ :

$$N_0 - N(t) = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

## Среднее время жизни материнского ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2) \approx (5)$$



$m_p$  и  $m_n$  - МАССЫ ПОКОЯ  
протона и нейтрона

5) зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов.

Н-р,  $p$  и  $n$  образуют дейтрон (ядро изотопа) только при условии параллельной ориентации их спинов;

6) не являются центральными.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}} \quad (4)$$

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



## ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА $T_{1/2}$ НЕКОТОРЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ (ВЫБОРОЧНО)

<b>Z</b>		<b>A</b>	<b><math>T_{1/2}</math></b>
1	Водород	3	12,3 лет
6	Углерод	14	5730 лет
7	Азот	13	10 мин
8	Кислород	15	124 с
11	Натрий	22	2,6 лет
		24	15 ч
15	Фосфор	32	14,3 сут.
16	Сера	35	87сут.
17	Хлор	36	3-10 <sup>5</sup> лет
		38	38 мин

86	Радон	222	3,83 сут.
88	Радий	226	1601 год
90	Торий	232	$1,41 \cdot 10^{10}$ лет
91	Протактиний	231	$3,25 \cdot 10^4$ лет
		233	27,4 сут.
92	Уран	233	$1,6 \cdot 10^5$ лет
		234	$2,5 \cdot 10^5$ лет
		235	$7,1 \cdot 10^8$ лет
		238	$4,5 \cdot 10^9$ лет
93	Нептуний	237	$1,15 \cdot 10^5$ лет
		239	2,3 сут.
94	Плутоний	239	$2,44 \cdot 10^4$ лет

1) силы притяжения:

2) короткодействующие. радиус действия  $\sim 10^{-15}$  м; на меньших расстояниях - отталкивание;

3) не зависят от заряда, одинаковы между двумя любыми нуклонами ( $n-p, p-p, p-n, n-n$ ). имеют незлектрическую природу;

4). свойственно насыщение (каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших нуклонов).

...это - число распадов, происходящих в нем в единицу времени.

$$A = \frac{dN}{dt} \quad \leftarrow \quad N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \left( \frac{N_0}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} = \lambda N$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau}$$

$\tau$  (4) - среднее время жизни материнского ядра

- **Единица активности (СИ) - беккерель (Бк),  
один распад в секунду.  
Внесистемная единица - кюри (Ки),  
активность 1 г изотопа радия  
(1 Ки = 3,7\*10<sup>10</sup> Бк).**

**Удельная активность- активность единицы массы  
радиоактивного препарата:**

$$a = \frac{A}{m}$$

## Бета-распад ( $\beta$ – распад)

- Самопроизвольный процесс, внутриядерное превращение нейтрона в протон, или протона в нейтрон, а также свободного нейтрона в протон.

**$\beta$ -распад** реализуется путем испускания:

а) электрона

б) позитрона

и к ним + электронные антинейтрино (а) и нейтрино (б)

$$\bar{\nu}_e$$
$$\nu_e$$

в) захватом электрона из К- оболочки атома.

## Три разновидности $\beta$ – распада

- 1). Электронный  $\beta^-$  - распад,  
ядро испускает электрон и зарядовое число ядра:

$$Z \rightarrow Z + 1;$$

- 2). Позитронный  $\beta^+$  - распад,  
ядро испускает позитрон и зарядовое число ядра:

$$Z \rightarrow Z - 1;$$

- 3). **K - захват**,

ядро захватывает один электрон из из K-оболочки атома и зарядовое число ядра:

$$Z \rightarrow Z - 1;$$

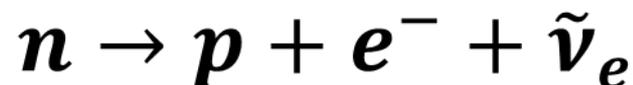
На пустое место в K-оболочке переходит электрон с другой оболочки, и поэтому **K - захват** всегда сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

## Электронный $\beta^-$ - распад

Электрон:  $Z = -1$  и массовое число  $A = 0$ , чтобы выполнить законы сохранения заряда и числа нуклонов в процессе распада.



В основе электронного  $\beta^-$  - распада - превращение в ядре нейтрона в протон:



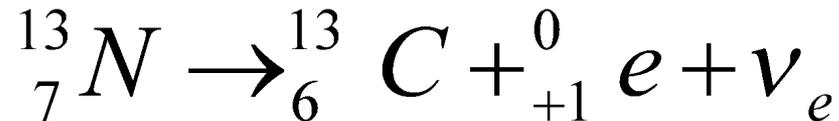
**Важный параметр ЯР – энергетический выход ЯР:**  
**разность суммы масс покоя продуктов до реакции**  
**( $m$ ) и после нее ( $m'$ ):**

- **Дочернее ядро при  $\beta^-$  - распаде может быть в возбужденном состоянии. При переходе ядра в основное - испускается  $\gamma$ -квант, аналогично  $\alpha$  – распаду.**

## 2. Позитронный $\beta^+$ - распад.

Позитрон:  $Z = +1$  и массовое число  $A = 0$

Ядро испускает позитрон, в результате чего его  $Z \rightarrow Z - 1$ . Происходит по схеме.....



Для понимания!!! ..... Полная энергия в ЯР сохраняется!

$E_0$  и  $E'_0$ ,  $K$  и  $K'$  — энергии покоя и кинетические энергии продуктов до и после ЯР.

Убыль суммарной энергии покоя = приращению суммарной кинетической энергии и наоборот.

Это и есть  $\Delta Q$ :

ЯР с  $Q > 0$  - с выделением энергии, кинетической),  $K' > K$

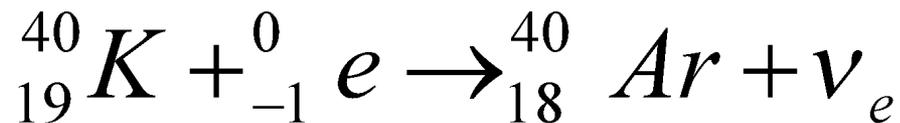
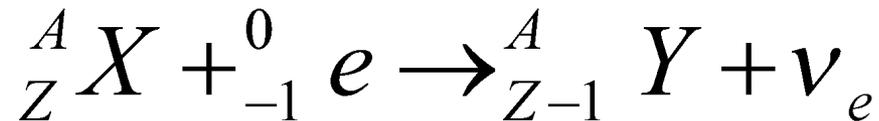
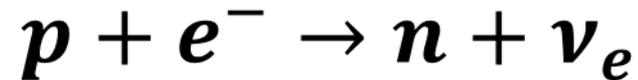
$$E_0 - E'_0 = K' - K = \Delta Q$$

---

Позитронный  $\beta^+$  - распад сопровождается испусканием  
позитрона  $e^+$  и нейтрино  $\nu_e$ , - античастиц,  
по отношению к частицам в электронном  $\beta^-$  - распаде.

# К-захват

При захвате ядром электрона  
(с электронной К-оболочки)  
происходит превращение одного из протонов ядра в  
нейтрон, что сопровождается испусканием нейтрино:



# Гамма-излучение ( $\gamma$ -излучение)

- Коротковолновое эл.магн. излучение, испускаемое ядрами при переходе из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией.

Ядро - квантовая система с дискретным набором энергетических уровней,

потому спектр  $\gamma$ -излучения - дискретен.

Энергия  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma$ , испускаемых различными ядрами:

$$10 \text{ кэВ} \leq E_\gamma \leq 5 \text{ МэВ.}$$

---

$$\text{Длина волны: } 2 \cdot 10^{-13} \text{ м} \leq \lambda \leq 10^{-10} \text{ м.}$$

- **Испускание  $\gamma$ -излучения - внутриядерный процесс.**

**$\gamma$ -излучение сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады ядер, при переходе дочернего ядра из возбужденного в основное состояние**

**Среднее время жизни ядра в возбужденном состоянии различно для разных ядер**

$$**10^{-15} \text{ с} \leq \tau_n \leq 10^{-7} \text{ с.}**$$

**За это время ядро переходит на более низкий энергетический уровень, испуская  $\gamma$ -излучение.**

## Взаимодействие излучения ( $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -) с веществом –

Уран в природе - в виде двух изотопов:

$^{238}\text{U}$  (99,3 %) и  $^{235}\text{U}$  (0,7 %).

Ядерное сырье -  $^{235}\text{U}$ .

Необходим процесс обогащения урана изотопом  $^{235}\text{U}$ .

**Характер взаимодействия излучения с веществом  
зависит от:**

**его вида, энергии, плотности потока, а также от  
физических и химических свойств самого вещества.**

**Продукты деления ядра  $^{235}\text{U}$  нестабильны: в них  
содержится избыточное число нейтронов.**

**При делении ядра  $^{235}\text{U}$  ..... + 2 или 3 нейтрона.  
Они могут попасть в другие ядра  $^{235}\text{U}$  - вызывают их  
деление.**

**Появятся 4 - 9 нейтронов - новые распады ядер  $^{235}\text{U}$  и  
т. д.**

**Лавинообразный процесс деления ядер - **цепная  
реакция.****

**Для **ЦР** - коэффициент размножения нейтронов  
д.б.  $k > 1$**

**Упругое рассеяние частиц ИИ– процесс столкновения частиц .....меняются только их импульсы, а внутреннее состояния остаются неизменным.**

**Неупругое рассеяние частиц ИИ приводит к изменению их внутреннего состояния, превращению в другие частицы или дополнительному рождению новых частиц.**

**Пробег R - минимальная толщина в-ва в направлении скорости частиц ИИ до их остановки или полного поглощения в-вом.**

**Пробег  $\alpha$  - частиц - очень мал:  
сотые доли мм - в биологических средах;  
2,5 - 8 см - в воздухе;  
несколько мкм - в живой ткани.**

**$\alpha$ -частицы приводят к большей линейной плотности ионизации.**

**Вдоль их короткого пути - большое число ионов.**

При полном делении всех ядер в 1 г  $^{235}\text{U}$ , выделяется энергия, как и при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

- **Активная зона** - основная часть реактора, в ней протекает ЦР и выделяется энергия. Объем АЗ - от  $0,0\text{n}$  литра до  $\text{n}10 \text{ м}^3$  (в больших тепловых реакторах).

**Активная зона реактора на  
тепловых нейтронах**

(с энергией  $0,0\text{n}$  эВ) состоит из:

ядерного топлива ( $^{235}\text{U}$ , даже слабо обогащ.  $\text{U}$ ),

замедлителя (вода, графит,  $\text{Be}$ ),

теплоносителя (н-р, вода, ..... для отвода тепла на парогенератор.... пар.....на турбину....электроэнергия),

конструкционных материалов с малым сечением захвата нейтронов ( $\text{Al}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Zr}$  и др).

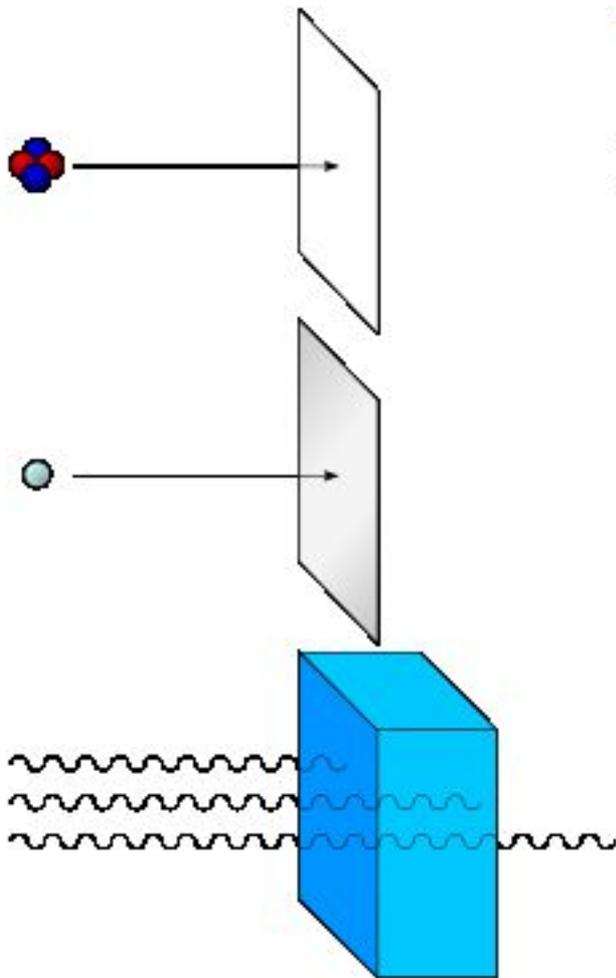
**$\gamma$  –излучение ( $\gamma$ -кванты) взаимодействует с электронными оболочками атомов, передавая часть своей энергии электронам, в результате чего наблюдаются:**

- фотоэффект ( $E_\gamma \leq 100$  кэВ) + характеристическое X-излучение
- эффект Комптона ( $E_\gamma \sim 0,5$  МэВ): возникающие быстрые электроны отдачи производят ионизацию атомов среды + рассеянные  $\gamma$ -кванты с уменьшенной энергией.
- рождение электронно-позитронных пар ( $E_\gamma > 2m_0c^2$ ), основной результат при больших энергиях  $\gamma$ -квантов.

- Пробеги  $\gamma$ -квантов и нейтронов в воздухе - сотни метров,

в ТТ – десятки см и даже метры.

$\gamma$  –излучение - наиболее проникающее ИИ,  
**поэтому при внешнем облучении они  
представляют для человека наибольшую  
опасность.**



$\alpha$ -частицы - легко остановить листом бумаги.

$\beta$ -излучение до 1 МэВ -  
*Al* - пластины толщиной в  
несколько мм.

$\gamma$ - излучение - эффективны тяжёлые элементы (свинец и т. д.), поглощают МэВ-ные фотоны при толщине несколько см.

Проникающая способность всех видов ИИ зависит от энергии частиц или квантов.

# Дозы и биологическое действие ионизирующего излучения

Доза поглощения - энергия ИИ, которая поглощается при прохождении через единицу массы вещества.

$$D_n = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

СИ -1 Грей (Гр) → 1кг вещества поглощает 1 Дж  
энергии излучения.

$$1 \text{ Рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$$

**Экспозиционная доза – для характеристики**

**X- и  $\gamma$ -излучения -**

**- заряд ионов одного знака, образующихся в единице массы сухого воздуха под их действием**

$$D_{\text{экс}} = \frac{\Delta Q}{\Delta m},$$

$$\Delta Q = \sum q_i$$

**СИ - Кл/кг.**

**Внесистемная единица - рентген (Р).**

$$1\text{Р} = 2,58 * 10^{-4} \text{ Кл / кг};$$

**М.б. использована для расчета поглощенной дозы.**

**В дозиметрии - сравнивают эффекты, вызванные различными ИИ, с эффектом от  $X$  – или  $\gamma$  – излучения.**

**Эквивалентная доза - поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на коэффициент качества данного излучения.**

**Коэффициент качества излучения показывает во сколько раз эффективность действия данного вида излучения больше, чем  $X$ - или  $\gamma$ -излучения.**

**Определяется из опыта.**

**Зависит от вида излучения, и энергии частиц.**

$$D_{\text{экв}} = kD_n = k \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad \text{СИ - Дж/кг, зиверт (Зв).}$$

## Коэффициент качества излучения

*Фотоны любой энергии	- 1
*Электроны и мюоны любых энергий	- 1
*Нейтроны энергией менее 10 кэВ	- 5
от 10 до 100 кэВ	- 10
от 100 до 2 МэВ	- 20
от 2 до 20 МэВ	- 10
более 20 МэВ	- 5
*Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	- 5
*Альфа частицы, осколки деления, тяжелые ядра	-10

Минимальная летальная доза для человека -  
**6 Зв** за один раз.

**Эффективная эквивалентная доза - для оценки ущерба здоровью человека при неравномерном облучении тела, отдельных его органов с учетом их радиочувствительности.**

$$D_{\text{экв}}^{\text{эф}} = k_p D_{\text{экв}}$$

**$k$  – коэффициент риска для отдельного органа при облучении всего тела одинаковой  $D_{\text{ЭКВ}}$**

**Костный мозг, толстый кишечник, легкие, желудок - 0,12**

**Мочевой пузырь, грудная железа, печень, пищевод, щитовидная железа - 0,05**

**Кожа, клетки костных поверхностей - 0,01**

**Остальное - 0,05**