26/p

### 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-, бетаи 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 XX - атомы и атомные ядра, имеют <u>сложную структуру</u>.

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

Протон – ядро атома водорода. е<sub>р</sub> ~ 1,6<sup>-19</sup> Кл.

Масса покоя:

 $m_p \sim 1,67\cdot 10^{-27}~{\rm kr}$  = 1836  $m_e$  = 1,007 а. е. м. Иногда - в значениях энергии ( $E=mc^2$ );  $m_p \sim 938,27~{\rm MpB}$ .

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

#### **Нейтрон** - Дж.Чедвик (1932 г.)

#### Масса покоя:

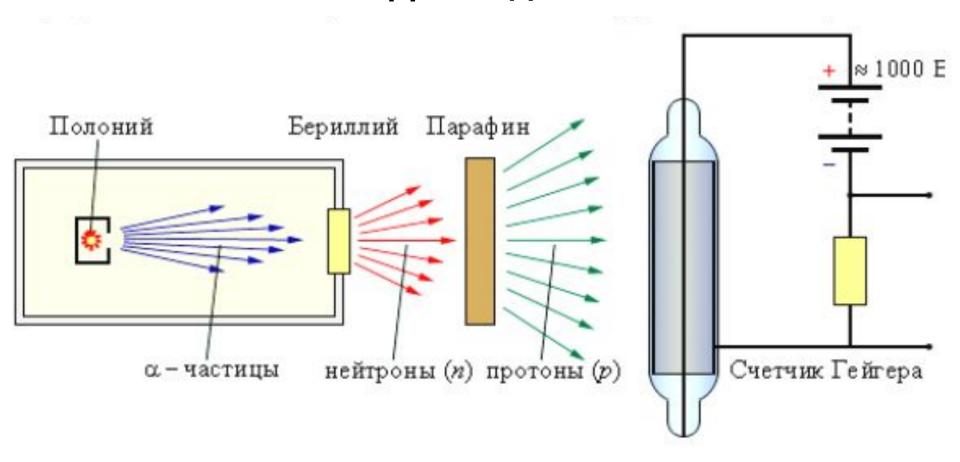
$$m_n \sim 1,674 \cdot 10^{-27}$$
 кг = 1,008 а. е. м = 939,56 МэВ. (>  $m_p$  = 938,27МэВ)

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 Ве α-частицами, испускаемыми радиоактивным Ри (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,

 ${}_Z^A X$  - ядра химических элементов,

X – химический символ элемента

В настоящее время известны ядра:

$$Z = 1 - 118$$

#### Описание атомного ядра

Обозначение	Определение	
$Z^{A}X$	Пример:  16 ——————————————————————————————————	
	Число нейтронов $N = A - Z$ . В ядре 8 нейтронов	

## **Изотопы** - ядра одного хим. эл., <u>отличаются числом</u> <u>нейтронов</u> *N*.

У них 
$$A = Z + N$$
 – разное.

Хим. элемент в природе - смесь изотопов.

#### Н-р, у водорода 3 изотопа:

 ${}^{1}H_{1}$  – протий, обычный водород, 1 протон,

 ${}^{2}H_{1}$  – дейтерий, 1 протон + 1 нейтрон,

 $^{3}H_{1}$  – тритий, 1 протон +2 нейтрона

Углерод – 6 изотопов, Кислород-3 изотопа M300apы - одинаковые A, но разные Z,

N30Т0НЫ - одинаковые N, но разные Z и A.

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

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

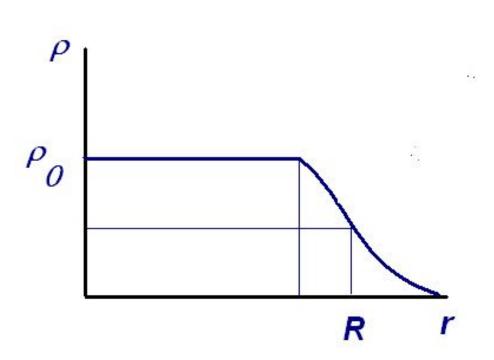
2300 ядер с разными Z, A и другими числами $_{c}$ 

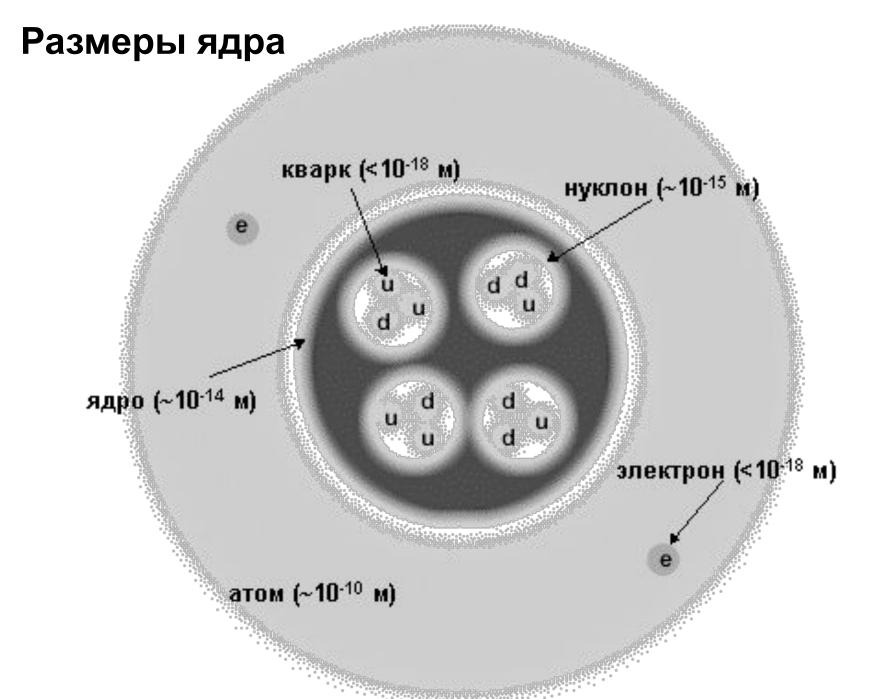
## Радиусы ядер хорошо аппроксимируются выражением....

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

$$R_0 = (1, 3 - 1, 7) 10^{-15} M$$
(6)

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





#### Энергия связи и масса ядер

• Масса ядра меньше суммы масс покоя составляющих нуклонов ( $m_{g}$  - масса ядра)

$$m_{\scriptscriptstyle g} < Z m_{\scriptscriptstyle p} + (A - Z) m_{\scriptscriptstyle n}$$

 $m_p$  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).

$$E_{ce} = (Zm_p + (A-Z)m_n - m_g)c^2$$



<u>∆</u>*m* - дефект масс

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

$$E_{ce}^{y\partial} = \frac{E_{ce}}{A} = \frac{\Delta m}{A}c^2 \tag{8}$$

Для большинства ядер ≈ 8 МэВ Для разрыва химической связи - в 10<sup>6</sup> раз меньше. <u>Наибольшая</u> для тяжелых ядер m > 50.

#### $\underline{\mathbf{X}}$

#### Если ядро имеет <u>наименьшую возможную энергию</u>

$$_{-}W_{min} = - W_{_{CB}}$$
 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 (~10<sup>17</sup> 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 ~10<sup>-15</sup> м; на меньших расстояниях -отталкивание;
- 3) не зависят от заряда, одинаковы между двумя любыми нуклонами (n p, p p, n n), имеют неэлектрическую природу;
- 4). свойственно насыщение (каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших нуклонов).

Полное насыщение ядерных сил достигается у α –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, 
 α -частицами, ионами и γ-квантами, или друг с другом.
 Впервые - Э. Резерфорд, при прохождении
 α-частиц через газ азот.

$$_{7}^{14}N +_{2}^{4}He \longrightarrow_{8}^{17}O +_{1}^{1}H$$
 $_{2}^{4}He - \alpha - частица$ 
 $_{1}^{1}H - протий, протон$ 

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:

$$_{3}^{7}Li + _{1}^{1}H \rightarrow _{2}^{4}He + _{2}^{4}He$$

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 <u>с тепловыми</u> <u>скоростями.</u>

## 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'):

$$\Delta Q = (\sum m - \sum m')c^2 = \Delta mc^2 \tag{1}$$

#### 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!

$$\boldsymbol{E_0} + \boldsymbol{K} = \boldsymbol{E_0'} + \boldsymbol{K'}$$

 $E_0$  и  $E'_0$ , К и К' — 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):

$$E_{nopozogas} = \frac{m_{s} + m}{m_{s}} |\Delta Q| \tag{2}$$

$$m_{_{\mathcal{B}}}$$
 – ядро – мишень

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

#### Эффективное сечение $\sigma$ ЯР.

 σ – характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдёт ЯР
 [σ] − (1барн = 10<sup>-28</sup> м²).

**о** интерпретируется как <u>площадь сечения ядра **х**, попадая в которую налетающая частица вызывает ЯР.</u>

## 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<sub>92</sub>0 - сейчас основной интерес для энергетики)

$$^{235}_{92}U +^{1}_{0}n \rightarrow^{144}_{56}Ba +^{89}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n$$

Тепловой нейтрон с энергией ~ 0,1 эВ освобождает энергию

 $\Delta Q \sim 200 \text{ M} \Rightarrow \text{B} > 0$ 

Реакция в общем виде...

$$_{92}^{235}U +_{0}^{1}n \longrightarrow_{Z}^{A}X +_{Z'}^{A'}Y + N_{0}^{1}n$$

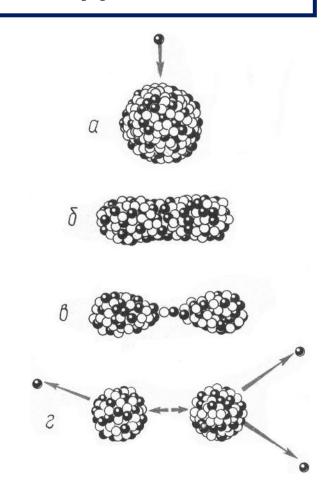
N = 2, 3;

До 100 изотопов в ходе реакции...

#### Объяснение в капельной модели..

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

Если изб. энергия < эн.актив. → ядро в исходное состояние испустив γ –квант



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

27

#### Нейтроны с энергией ~1 МэВ и выше, вызывают деление ядер урана, тория, плутония и др:

$$^{238}_{92}U$$

$$^{232}_{90}Th$$

$$^{232}_{90}Th$$
  $^{239}_{94}Pu$ 

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

$$^{235}_{92}U$$

$$^{239}_{94}Pu$$

Уран в природе - в виде двух изотопов:

Необходим процесс обогащения урана изотопом

$${}_{92}^{235}U + {}_{0}^{1}n \longrightarrow_{Z}^{A} X + {}_{Z'}^{A'}Y + N_{0}^{1}n$$

Продукты деления ядра <sup>235</sup>

 *∪* нестабильны: в них содержится избыточное число нейтронов.

При делении ядра <sup>235</sup> U ...... + 2 или 3 нейтрона. Они могут попасть в другие ядра <sup>235</sup> U - вызывают их деление.

Появятся 4 - 9 нейтронов - новые распады ядер <sup>235</sup>*⊍* и т. д.

Лавинообразный процесс деления ядер - цепная реакция.

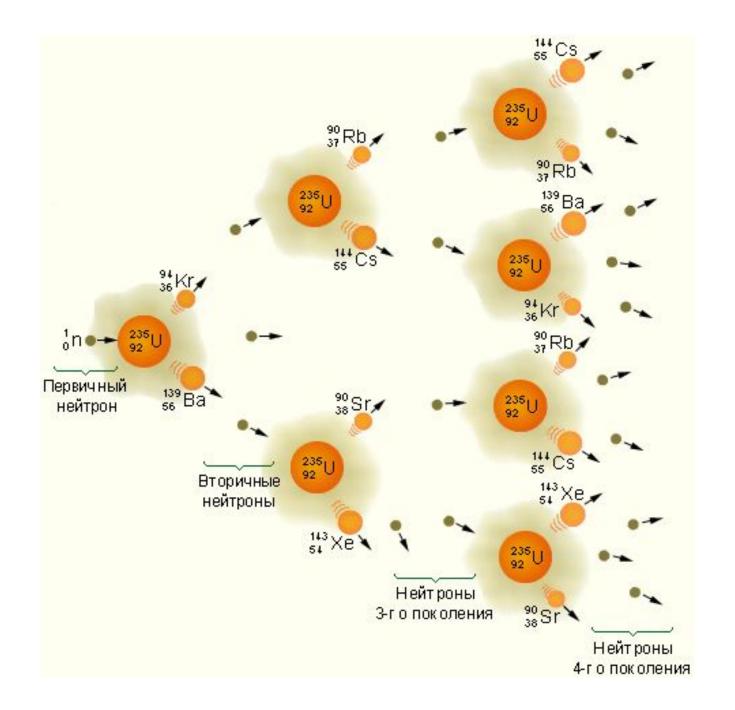
Для ЦР - коэффициент размножения нейтронов д.б. k > 1

**ЦР** в уране с повышенным содержанием <sup>235</sup>*U* развивается, когда масса урана превосходит критическую массу.

В небольших кусках *U* большинство нейтронов, не попав ни в одно ядро, вылетают наружу.

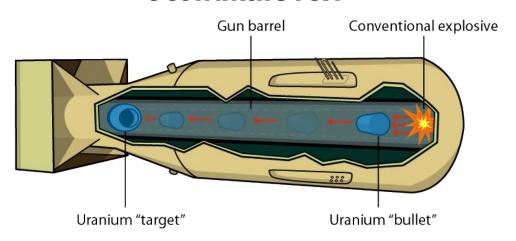
Для чистого <sup>235</sup>*U* - 50 кг.

~250 г - применение замедлителей нейтронов (н-р, тяжелая вода  $D_2O$ , графит) и оболочки из Be, которая отражает нейтроны.



ЦР: управляемые и неуправляемые.
Взрыв атомной бомбы - неуправляемая реакция.

Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней <sup>235</sup> или <sup>239</sup> Ри (плутоний) делятся на две удаленные части с массами ниже критических. С помощью обычного взрыва массы сближаются



При полном делении всех ядер в 1 г <sup>235</sup>*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 - 3·10<sup>16</sup> 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 м³ (в больших тепловых реакторах).

Активная зона реактора на <u>тепловых нейтронах</u> (с энергией 0,0n эВ) состоит из:

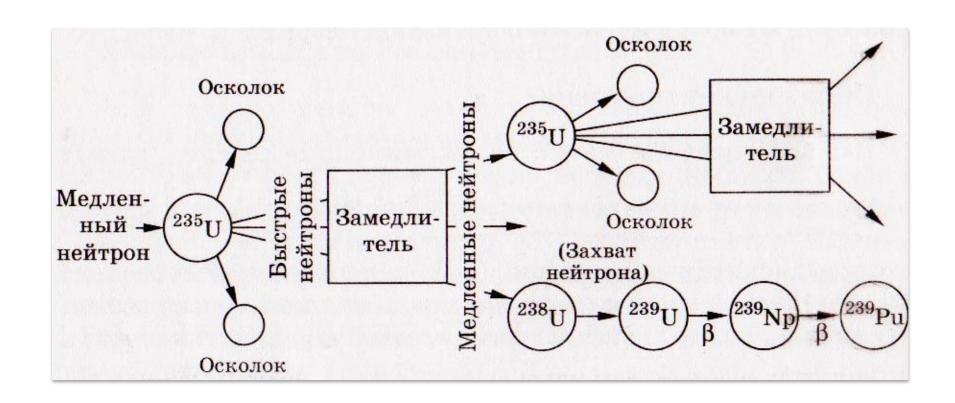
ядерного топлива ( $^{235}U$ , даже слабо обогащ. U),

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 продолжат взаимодействие с <sup>235</sup>U.



# Управление реактором - при помощи регулирующих стержней, содержащих *С* или *В*. (*k*- коэффициент размножения нейтронов)

При выдвинутых из A3 стержнях k > 1.

При полностью вдвинутых стержнях k < 1.

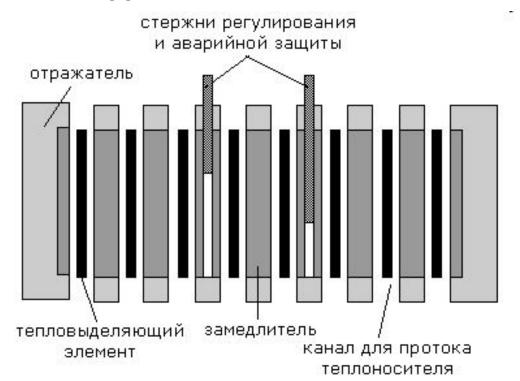


Вдвигая стержни внутрь АЗ можно в любой момент времени приостановить развитие ЦР

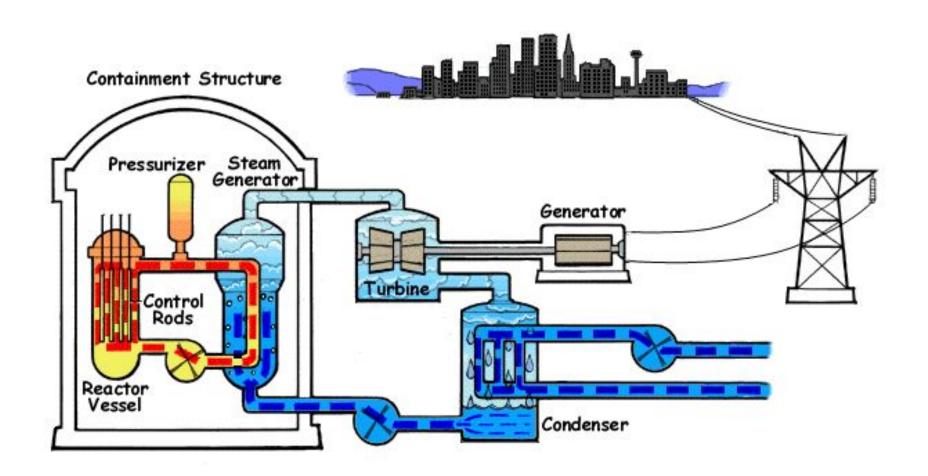
#### Модели ядерных реакторов:

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

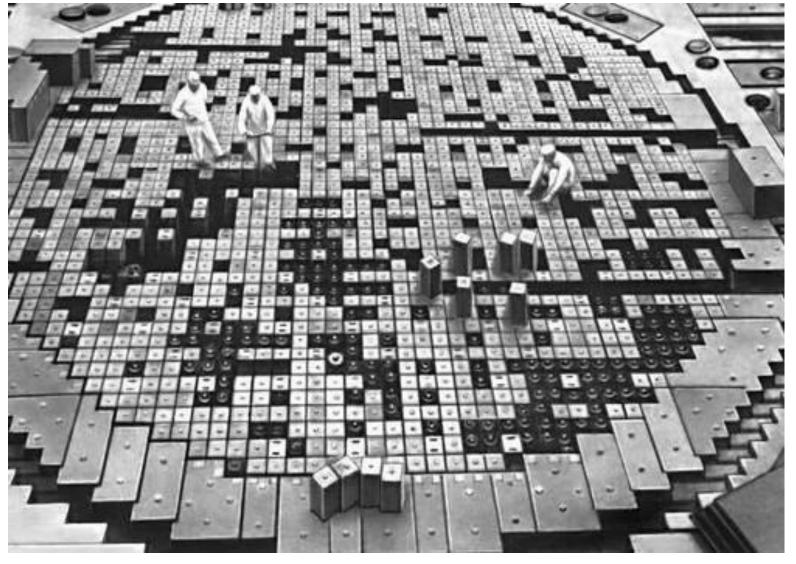
Гетерогенные реакторы – в АЗ замедлитель, в который помещаются кассеты с ядерным топливом - тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Энергия выделяется в ТВЭЛах.



# 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.

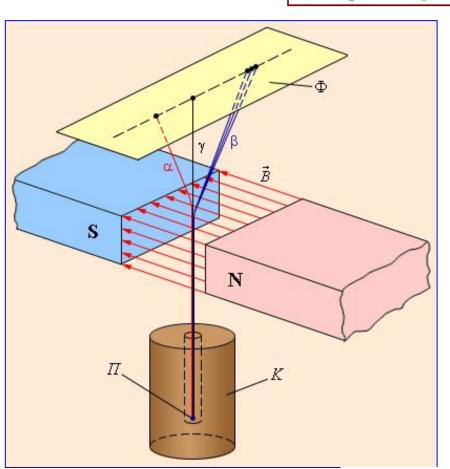
Впервые А. Беккерель (1896 г.) обнаружил, что соли урана испускают неизвестное излучение, проникающее через непрозрачные для света преграды и вызывают почернение фотоэмульсии.

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:

α – и β –лучи отклоняются в противоположных направлениях, причем β-лучи - больше. γ-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

у-фотона

# Основные типы радиоактивности Альфа-распад

Сильное проникающее излучение возникает при бомбардировке Ве α-частицами, испускаемыми радиоактивным Ри (полоний).

$$_{Z}^{A}X \rightarrow_{Z-2}^{A-4} Y +_{2}^{4} He + Q$$

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

#### Например:

$$^{238}_{92}U \rightarrow^{234}_{90} Th +^{4}_{2} He + Q$$

При α-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 α-частицы,

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

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

Дочернее ядро - в возбужденном состоянии → переход в основное состояние с испусканием у-кванта

## Основной закон радиоактивного распада

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

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

«Дочернее ядро» - еще в материнском ядре.

Пусть ядра распадаются независимо друг от друга.

лостоянная 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

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

Проинтегрируем (1), считая, что **д** не зависит от времени.

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\int_{0}^{t} \lambda dt$$

```
H-р, у водорода 3 изотопа:

<sup>1</sup>H<sub>1</sub> – протий, обычный водород, 1 протон,

<sup>2</sup>H<sub>1</sub> – дейтерий, 1 протон + 1 нейтрон,

<sup>3</sup>H<sub>1</sub> – тритий, 1 протон +2 нейтрона

Углерод – 6 изотопов,
Кислород-3 изотопа
```

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

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

N(t) — число <u>нераспавшихся</u> 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.

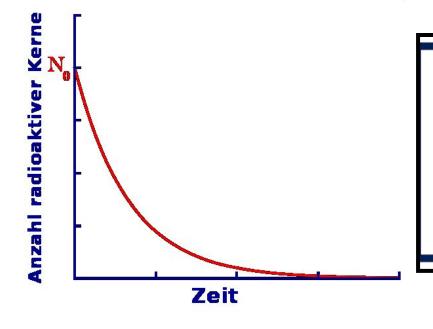
Число распавшихся ядер за время t:

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

### Среднее время жизни материнского ядра

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

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



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

- 5) зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов.
- H-p, p и n образуют дейтрон (ядро изотопа) только при условии <u>параллельной ориентации их спинов;</u>
  - 6) не являются центральными.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}}$$
 (4)
 $T_{1/2} = 0.693\tau$ 



# ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА Т1/2 НЕКОТОРЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ (ВЫБОРОЧНО)

Z		A	T <sub>1/2</sub>
1	Водород	3	12,3 лет
6	Углерод	14	5730 лет
7	Азот	13	10 мин
8	Кислород	15	124 c
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•10 <sup>10</sup> лет
91	Протакти ний	231	3,25•10 <sup>4</sup> лет
		233	27,4 сут.
92	Уран	233	1,6•10 <sup>5</sup> лет
		234	2,5•10 <sup>5</sup> лет
		235	7,1•10 <sup>8</sup> лет
		238	4,5•10 <sup>9</sup> лет
93	Нептуний	237	1,15•10 <sup>5</sup> лет
		239	2,3 сут.
94	Плутоний	239	2,44•10 <sup>4</sup> лет
	201		

1) силы притяжения;

2) короткодействующие, радиус действия ~10<sup>-15</sup> м;

1) короткодействующие, радиус действия ~10<sup>-15</sup> м;

2) короткодействующие, радиус действия ~10<sup>-15</sup> м;

на меньших расстояниях -отталкивание;

3) не зависят от заряда, одинаковы между двумя

Любыми нуклонами (2 - 2,2 - 2,2 - 2), имеют

неэлектрическую природу;

4), свойственно насыщение (каждый нуклон в ядре
взаимодействует только с ограниченным числом

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

$$A = \frac{dN}{dt} \qquad \triangleright N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3}$$

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

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

(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.

**β-распад** реализуется путем испускания:

- а) электрона
- б) позитрона

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

$$\widetilde{V}_{e}$$
  $V_{e}$ 

в) захватом электрона из К- оболочки атома.

## Три разновидности $\beta$ — распада

1). Электронный β⁻- распад, ядро <u>испускает электрон</u>и зарядовое число ядра:

$$Z \rightarrow Z + 1$$
;

2). Позитронный <sup>β+</sup>- распад, ядро <u>испускает позитрон</u>и зарядовое число ядра:

$$Z \rightarrow Z - 1$$
;

3). К - захват,

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

$$Z \rightarrow Z - 1$$
;

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

## **Электронный** $\beta^{-}$ - распад

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

$$_{Z}^{A}X \rightarrow_{Z+1}^{A} Y +_{-1}^{0} e + \widetilde{\boldsymbol{\nu}}_{e}$$

$${}_{6}^{14}C \rightarrow {}_{7}^{14}N + {}_{-1}^{0}e + \tilde{\nu}_{e}$$

В основе электронного <a href="#">β - распада - превращение в ядре нейтрона в протон:</a>

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$$

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

Дочернее ядро при β⁻- распаде может быть в возбужденном состоянии.
 При переходе ядра в основное - испускается γ-квант, аналогично α – распаду.

## 2. Позитронный $\beta^+$ - распад.

Позитрон: Z = +1 и массовое число A = 0 Ядро <u>испускает позитрон</u>, в результате чего его  $Z \rightarrow Z - 1$ . Происходит по схеме.....

$$_{Z}^{A}X \rightarrow_{Z-1}^{A} Y +_{+1}^{0} e + v_{e}$$

 $\nu_e$ 

$$_{7}^{13}N \rightarrow_{6}^{13}C+_{+1}^{0}e+v_{e}$$

ДЛЯ ПОНИМАНИЯ!!! ...... ПОЛНАЯ ЗНЕРГИЯ В ЯГ СОХРАНЯЕТСЯ

Е° И Е°° \* К И К° — ЭНЕРГИИ ПОКОЯ И КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭНЕРГИИ
ПРОДУКТОВ ДО И ПОСЛЕ ЯР.
Убыль суммарной энергии покоя = приращению
суммарной кинетической энергии и наоборот.
Это и есть дQ:

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

Позитронный  $\beta^+$ - распад сопровождается испусканием позитрона  $e^+$  и нейтрино  $v_e$ , - 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:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

$$_{Z}^{A}X +_{-1}^{0} e \rightarrow_{Z-1}^{A} Y + v_{e}$$

$$_{19}^{40}K +_{-1}^{0}e \rightarrow_{18}^{40}Ar + v_{e}$$

## Гамма-излучение (у-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 у-излучения - дискретен.

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

10 кэВ ≤  $E_{\gamma}$  ≤ 5 МэВ.

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

Испускание у-излучения - внутриядерный процесс.

у-излучение сопровождает α- и β-распады ядер, при переходе дочернего ядра из возбужденного в основное состояние

Среднее время жизни ядра в возбужденном состоянии различно для разных ядер

$$10^{-15}$$
c  $\leq \tau_n \leq 10^{-7}$  c.

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

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

Уран в природе - в виде двух изотопов:

<sup>238</sup> *U* (99,3 %) и <sup>235</sup> *U* (0,7 %). Ядерное сырье - <sup>235</sup> *U*.

Необходим процесс обогащения урана изотопом <sup>235</sup> *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 <sup>235</sup>*U* нестабильны: в них содержится избыточное число нейтронов.

При делении ядра <sup>235</sup>*U* ...... + 2 или 3 нейтрона. Они могут попасть в другие ядра <sup>235</sup>*U* - вызывают их деление.

Появятся 4 - 9 нейтронов - новые распады ядер <sup>235</sup>*⊍* 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 α - частиц - очень мал: сотые доли мм - в биологических средах; 2,5 - 8 см - в воздухе; несколько мкм - в живой ткани.

«-частицы приводят к большей линейной плотности ионизации.

Вдоль их короткого пути - большое число ионов.

При полном делении всех ядер в 1 г <sup>235</sup>*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 0,0n литра до n10 м³ (в больших тепловых реакторах).

Активная зона реактора на <u>тепловых нейтронах</u> (с энергией 0,0n эВ) состоит из:

ядерного топлива ( $^{235}U$ , 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).

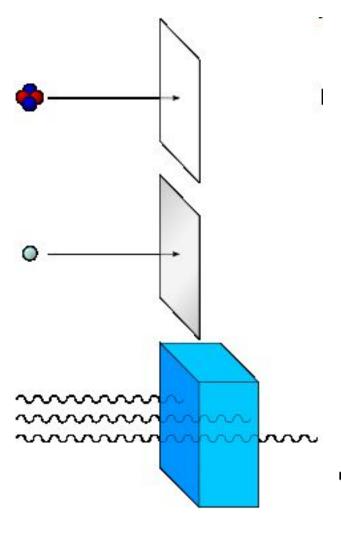
у – излучение (у – кванты) взаимодействует с электронными оболочками атомов, передавая часть своей энергии электронам, в результате чего наблюдаются:

- фотоэффект ( $E_{\gamma} \leq 100 \, \text{кэВ}$ ) + характеристическое *X*-излучение
- эффект Комптона (E<sub>γ</sub> ~0, 5 MэВ): возникающие быстрые электроны отдачи производят ионизацию атомов среды + рассеянные γ-кванты с уменьшенной энергией.
  - рождение электронно-позитронных пар  $(E_{\gamma} > 2mec^2)$ , основной результат при больших энергиях  $\gamma$ -квантов.

Пробеги γ–квантов и нейтронов в воздухе - сотни метров,

в TT – десятки см и даже метры.

у –излучение - наиболее проникающее ИИ, поэтому при внешнем облучении они представляют для человека наибольшую опасность.



α-частицы - легко остановить листом бумаги.

β-излучение до 1 МэВ - *Al* - пластины толщиной в <u>несколько мм</u>.

γ- 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 Рад = 
$$10^{-2}$$
 Гр

# Экспозиционная доза — для характеристики X- и $\gamma$ -излучения -

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

$$D_{_{\mathcal{ ext{9}KCN}}} = rac{\Delta \mathcal{Q}}{\Delta m}, \ \Delta \mathcal{Q} = \sum q_i$$

СИ - Кл/кг.

Внесистемная единица - рентген (Р). 
$$1P = 2,58 * 10^{-4} \text{ Кл / кг};$$

М.б. использована для расчета поглощенной дозы.

В дозиметрии - сравнивают эффекты, вызванные различными ИИ,

с эффектом от X — или Y – 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 *y*-излучения.

Определяется из опыта. Зависит от вида излучения, и энергии частиц.

$$D_{_{9KB}}=kD_{_{n}}=krac{\Delta E}{\Delta m}$$
 СИ - Дж/кг, зиверт (3в).

### Коэффициент качества излучения

*Фотоны любой энергии	- 1
*Электроны и мюоны любых энергий	
*Нейтроны энергией менее 10 кэв	
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	
*Альфа частицы, осколки деления, тяжелые ядра	

Минимальная летальная доза для человека - 6 3в за один раз.

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

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

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