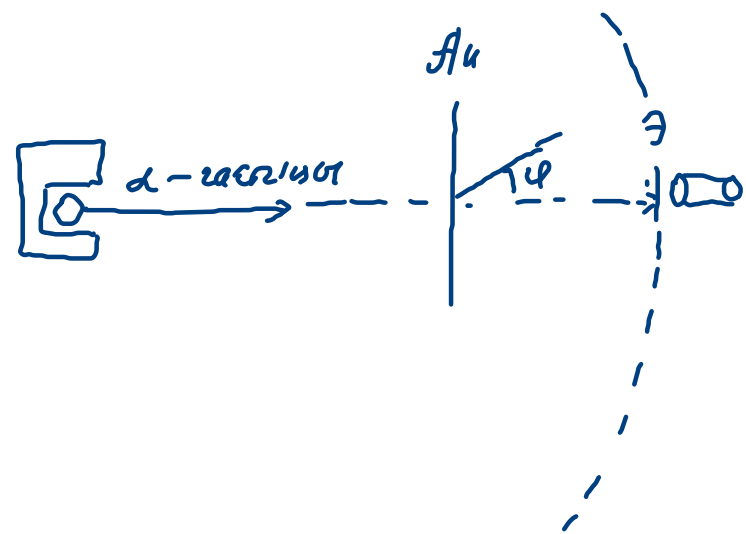


# Физика атомного ядра

## Характеристики атомного ядра



Водород - три изотопа

- ${}^1_1\text{H}$  - протий
- ${}^2_1\text{H}$  - дейтерий
- ${}^3_1\text{H}$  - тритий



2500 ядер, облетающих

$Z$  или  $N$

Изотопы

Ядро - положительно заряженное

размеры ядра  $\sim 10^{-15} \div 10^{-14}$  м

размеры атома  $\sim 10^{-10} \div 10^{-9}$  м

Ядро состоит из нейтронов и протонов

$$q_p = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \quad q_n = 0$$

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1836 m_e$$

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1839 m_e$$

протоны и нейтроны  $\Rightarrow$  нуклоны

$A$  - общее число нуклонов в ядре (массовое число)

$Z$  - зарядовое число, число протонов в ядре (порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева)

Известно 118 ядер с  $Z = 1 \div 118$

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$  - обозначение ядра

Заряд ядра

$$\underline{q_x = Z q_p}$$

Изотопы - одинаковое  $Z$ , но разное число нейтронов  $N = A - Z$

Изобары - разное  $Z$ , но одинаковое  $N$

Ядро представляет в виде шара

$$R_{\text{я}} = (1,3 \div 1,7) A^{1/3} \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

$V_{\text{я}} \sim A$ , плотность ядерного вещества  
 $\approx 10^{17} \text{ кг/м}^3$

Для большинства ядер  $\frac{N}{Z} = 1$

Для тяжелых ядер  $\frac{N}{Z} \approx 1,6$

Ядро имеет момент импульса (спин ядра)

и магнитный момент

Спин ядра = сумма спинов протонов и нейтронов

и орбитальных моментов нуклонов,

движущихся в ядре

$A$  - четное; спин ядра целый  $\rightarrow$   
 $A$  - нечетное;  $\rightarrow$  "  $\rightarrow$  полуцелый

# Дефект массы и энергия связи ядра

Ядро - устойчивая система, устойчивое образование

$${}^A_Z X ; \quad m = Z m_p + N m_n = Z m_p + (A - Z) m_n$$

$$m_{\text{я}} \leftarrow$$

$$m_{\text{я}} < m$$

$\frac{Q_{\text{я}}}{m_{\text{я}}}$  - движение в магн. полях

$\Delta m = m - m_{\text{я}}$  - дефект массы ядра ( $\Delta m = m_{\text{я}} - m$ )

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}$$

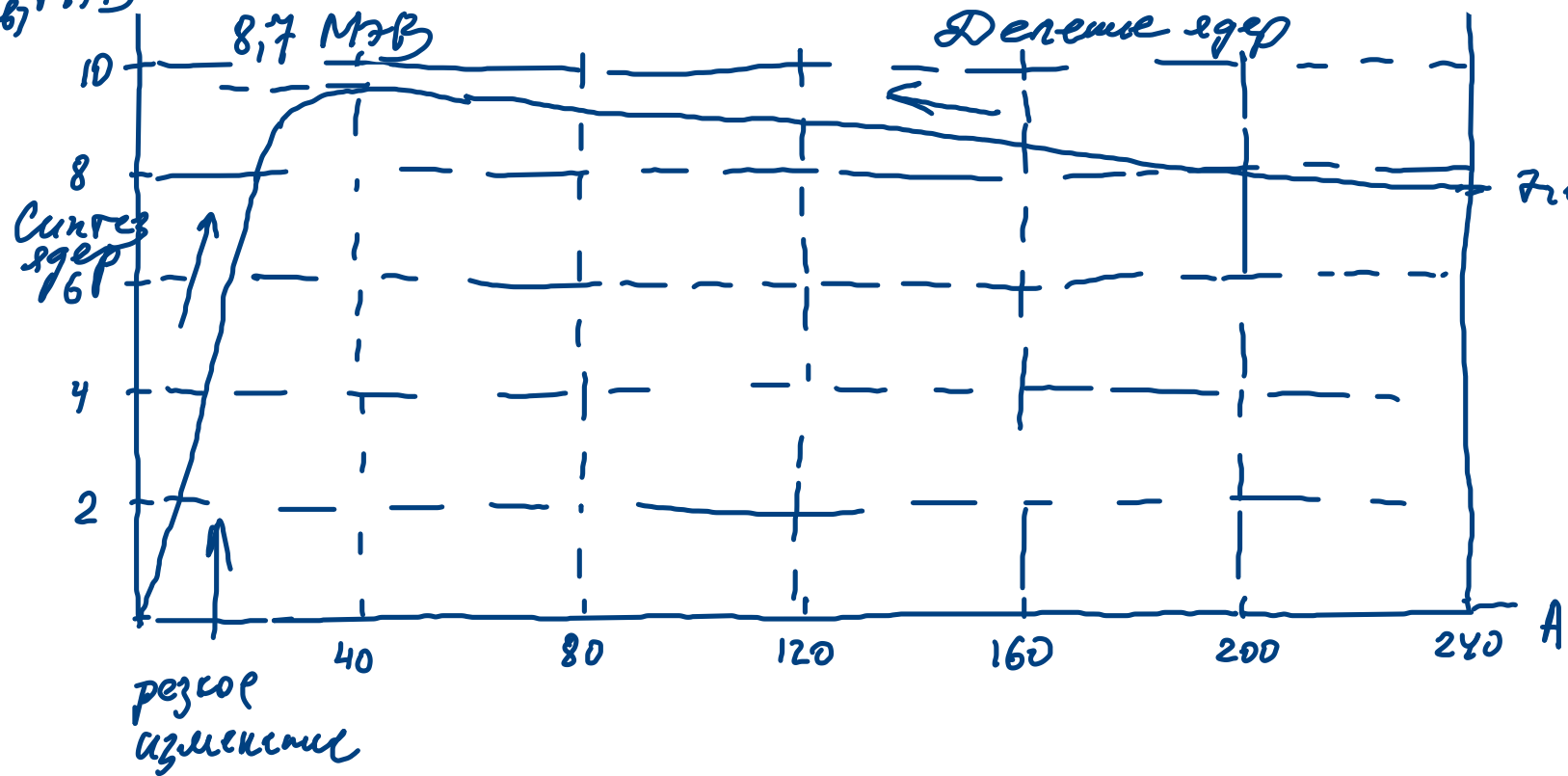
$$E = mc^2$$

$E_{\text{св}} = \Delta m c^2$  - энергия связи, выделяется при образовании ядра из нуклонов

$\frac{E_{\text{св}}}{A} = \delta E_{\text{св}}$  - удельная энергия связи

$$\delta E_{\text{св}} = f(A)$$

$\delta E_{cb}, \text{MэВ}$



$\delta E_{cb}$   ${}^2_1\text{H}$  1,1 MэВ

$1 \cdot B = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

${}^4_2\text{He}$  7,1 MэВ

${}^6_3\text{Li}$  5,3 MэВ



# Ядерные силы и их свойства

Между нуклонами в ядре существуют ядерные силы (сильное взаимодействие)

1. Яд. Силы притягательные

2. Яд. Силы короткодействующие  $r \leq 10^{-15}$  м

$r = 10^{-15}$  Ядерные силы больше кулоновских сил отталкивания в 100 раз

3. Зарядовая независимость (не экспериментальная природа)

$\oplus \rightarrow \leftarrow \oplus$

$\oplus \rightarrow \leftarrow \bigcirc$

$\ominus \rightarrow \leftarrow \ominus$

4. Свойства насыщения (каждый нуклон взаимодействует с ограниченным числом соседних нуклонов)

5. Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов

6. Яд. силы не центральные

## Модели ядра

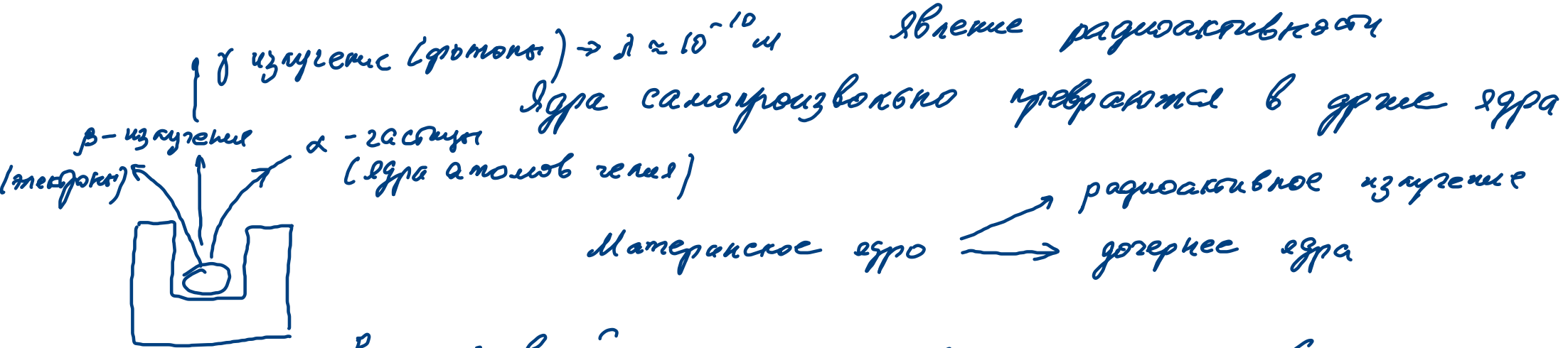
Ядро — сложная квантово-механическая система, нет единой модели

1. Капельная модель
2. Оболочечная модель
3. Обобщенная модель
4. Оптическая модель

и др.

# Радиоактивное излучение и его виды

Фр. физик А. Беккерель - 1896 г. - радиоактивное излучение



Радиоактивный распад происходит самопроизвольно

## Закон радиоактивного распада

$t = 0$

$N_0$  - имеется в начале ядра

$dN \sim dt$

$dN = -\lambda N dt$

$t$

$N$  - осталось ядер

$dN \sim N$

$\lambda$  - коэффициент пропорциональности

$dt$

$dN$  - распадаются ядра за время

$dN \sim N dt$

$\lambda$  - постоянная распада

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

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

$$d \ln N = -\lambda dt$$

$$d \ln N = -d(\lambda t)$$

$$d \ln N + d(\lambda t) = 0$$

$$d(\ln N + \lambda t) = 0$$

$$\ln N + \lambda t = \text{const} \Rightarrow \ln \text{const}$$

$$\ln N - \ln \text{const} = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{\text{const}} = -\lambda t$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{N}{\text{const}}$$

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

$$t=0; N=N_0$$

$$N_0 = \text{const} e^{-\lambda \cdot 0} = \text{const}$$

const = N<sub>0</sub> ↓

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

закон р.распада

N - число нераспавшихся ядер к моменту t.

Число распавшихся ядер

$$\Delta N = N_0 - N =$$

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

T<sub>1/2</sub> - период полураспада, промежуток времени, за который уменьшается половина ядер

$$t=0; N_0$$

$$t=T_{1/2} \quad N = \frac{N_0}{2}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2}; \quad T_{1/2} \approx \frac{0,693}{\lambda}$$

T<sub>1/2</sub>

|                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| <sup>139</sup> <sub>54</sub> Xe | - 39,7 с                     |
| <sup>222</sup> <sub>86</sub> Rn | - 382 гка                    |
| <sup>60</sup> <sub>30</sub> Co  | - 5,26 лет                   |
| <sup>238</sup> <sub>92</sub> U  | - 7,13 · 10 <sup>8</sup> лет |

|     |                |         |
|-----|----------------|---------|
| t=0 | N <sub>0</sub> | dt → dN |
| t   | N              | dN → t  |

Общее время жизни

$$|dN| \cdot t = t N \lambda dt$$

Интегрируем по t (0 - ∞)

$$\tau = \frac{\int_0^\infty |dN| \cdot t}{N_0} - \text{среднее время жизни}$$

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

$A; Z$  1500 ядер - нуклиды естественные; искусственные

Активность нуклида  $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$  - число распадов ядер за единицу времени, в СИ за 1с.

$[A]$  - Бк (беккерель)

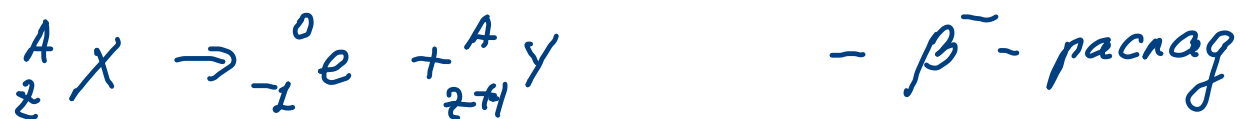
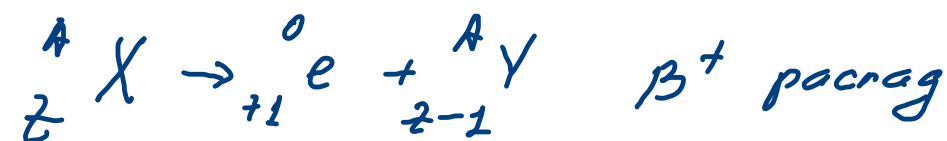
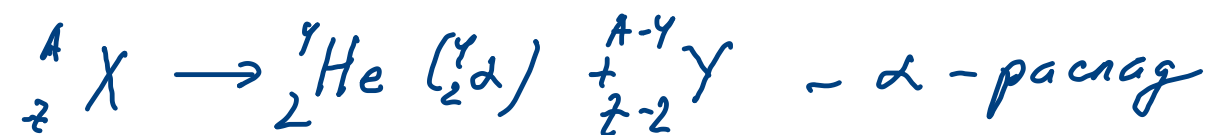
1 Бк - распад одного ядра за 1с

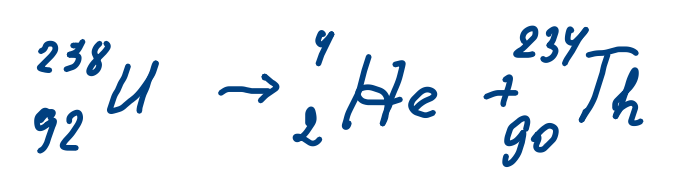
Внесистемная единица Ки (кюри)  $1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10}$  Бк

Р.р. происходит в соответствии с правилами смещения

Сумма зарядовых чисел и массовых чисел возникающего ядра

застыт равна з. числу и м. числу исходного ядра (материнское ядро)





$\alpha$ ;  $\beta$ ;  $\gamma$  излучение

# Ядерные реакции и их основные виды

Ядерная реакция - превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (и не только,  $\alpha$  - частица) или друг с другом.



X и Y - исходное и конечное ядро

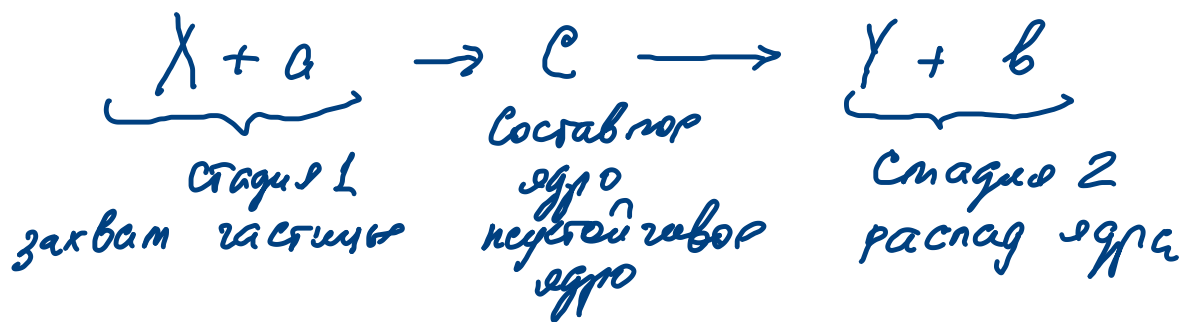
a - бомбардирующая частица

b - испускаемая частица

В реакции протекает в два этапа

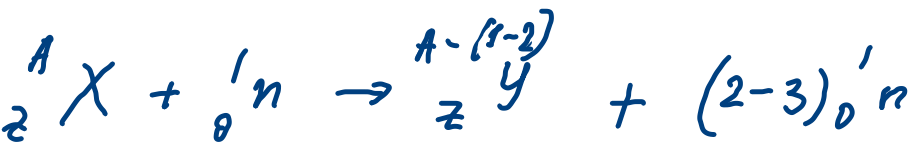
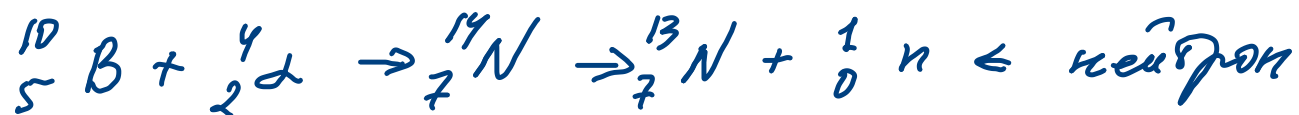
Выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса зарядовых и массовых чисел

Реакция - экзотермическая  
- эндотермическая



Первая я. реакция Э. Резерфорда 1919г.

атом азота бомбардировали α - частицами



Нейтроны различаются по энергией

Медленные нейтроны:

Ультракосмические  $< 10^{-7}$  эВ

отель холодные  $10^{-7} - 10^{-4}$  эВ

холодные  $10^{-4} - 10^{-3}$  эВ

тепловые  $10^{-3} - 0,5$  эВ

резонансные  $0,5 - 10^4$  эВ

Быстрые нейтроны!

Сверхбыстрые  $10^4 - 10^8$  эВ

Високоскоростные  $10^8 - 10^{10}$  эВ

релятивистские  $> 10^{10}$  эВ

$\sim kT$





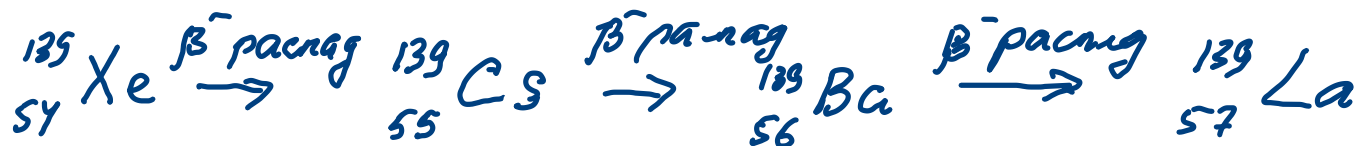
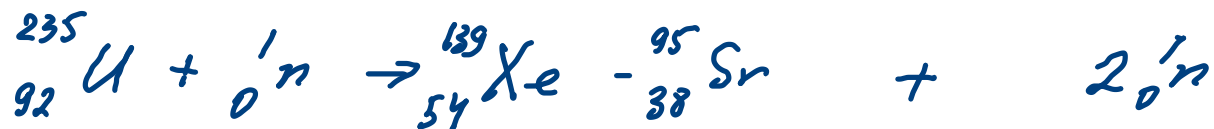
### Реакция деления ядра

Для тяжелых ядер  $\rightarrow$  ядро поглощает нейтрон, делится на несколько осколков, ядра меньшей массы, испускается 2-3 нейтрона, выделяется энергия

$\frac{N}{Z} \approx 1.6$

Для легких ядер (наиболее устойчивые)

$$\frac{N}{Z} \approx 1$$





Истускаются нейтроны за время  $< 10^{-14}$  с. Мгновенные нейтроны

0,7% нейтронов истускаются  $0,05 \leq t \leq 60$  с. Запоздавающие нейтроны

Энергия нейтрона:  $0 \div 7 \text{ МэВ} = 7 \cdot 10^6 \text{ эВ}$   $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Ср. число нейтронов на одну акт деления - 2,5

Уд. энергия связи: Тяжелые ядра - 7,5 МэВ

Средние ядра - 8,7 МэВ

Реакция деления ядра - выделяется энергия 1,1 МэВ на одну реакцию

На одну ядро выделяется в среднем  $1,1 \text{ МэВ} \times 2,5 = 2,75 \text{ МэВ}$

# Цепная реакция деления

$k > 1$  Коэффициент размножения нейтронов

Критический размер активной зоны

Критическая масса

Неуправляемая яд. реакция ( $k > 1$ )

яд. бомба

Управляемая яд. реакция ( $k = 1$ )

яд. реактор

Активная зона  
делится ядра

${}_{92}^{235}\text{U}$  - 0,7% в сырье

${}_{90}^{232}\text{Th}$  - сырье для получения искус. яд. топлива

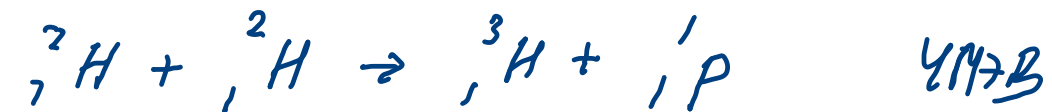
${}_{92}^{238}\text{U}$  ~ 99,7% в сырье



# Реакция синтеза ядер

Эдг. реакция идет на один выделяется энергии 1,1 МэВ

При синтезе ядер выделяется энергии 905 МэВ



$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \approx 0,7\text{МэВ}$$

$$\frac{0,70}{2} \approx 0,35\text{МэВ} \approx \frac{3}{2}kT$$

$$T \approx 2,6 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

