

6. Элементы ядерной физики.

6.1. Состав и характеристика атомного ядра.

- Атомное ядро состоит из *протонов* и *нейтронов*. Эти частицы называют *нуклонами*.

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ а.е.м.} = 931,5 \text{ МэВ} \quad \text{Энергетический эквивалент а.е.м.}$$

Протон:

Заряд:

$$+e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Масса:

$$m_p = 1,00759 \text{ а.е.м.} = 938,28 \text{ МэВ} = 1836 \cdot m_e$$

Спин:

$$s = \frac{1}{2}$$

Нейтрон:

Заряд:

0

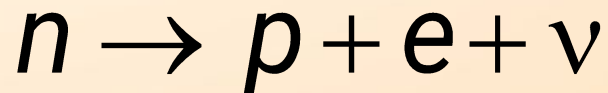
Масса:

$$m_n = 1,00898 \text{ а.е.м.} = 939,55 \text{ МэВ} = 1839 \cdot m_e$$

$$m_n - m_p = 2,5 \cdot m_e$$

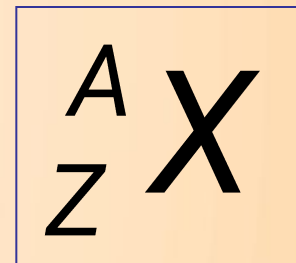
Спин:

$$s = 1/2$$



$$T_{1/2} = 12 \text{ мин.}$$

Характеристики ядра:



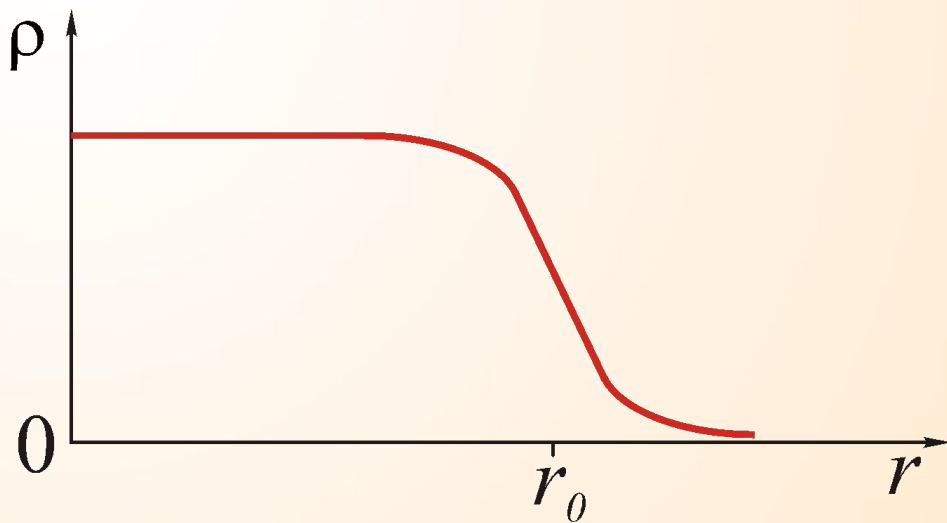
Z – *зарядовое число* (число протонов в ядре)

A – *массовое число*

$$N = A - Z \quad - \text{число нейтронов}$$



- Ядра с одинаковым зарядовым числом, но разным массовым, называются *изотопами*.



$$V \sim r_0^3 \sim A$$

$$r_0 = 1,3 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ м}$$

$$\rho \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$$

6.2. Ядерные силы

Ядерные силы (сильное взаимодействие) действуют между нуклонами и не дают протонам разлететься под действием кулоновских сил.

Ядерные силы - силы притяжения

Ядерные силы не являются центральными

Ядерные силы короткодействующие $\sim 10^{-15}$ м.

- Ядерные силы обладают зарядовой независимостью.
- Ядерные силы зависят от ориентации спинов.
- Ядерные силы обладают свойством насыщения.

Механизм сильного взаимодействия.

Согласно квантовым представлениям одна из взаимодействующих частиц испускает квант поля, а другая его поглощает. Например, взаимодействие заряженных частиц обусловлено обменом фотонами (виртуальными).

При взаимодействии нуклонов квантами поля являются π – мезон. (Х. Юкава, 1935 г)

Существуют $\pi^+; \pi^-; \pi^0$

$$m_{\pi} \sim 270m_e$$

Модели ядер:

Капельная модель (Френкель, Борн) – позволила вывести полуэмпирическую формулу энергии связи ядра и объяснить процесс деления тяжелых ядер.

Оболочечная модель (Гепперт-Майер, Йенсен) – нуклоны заполняют дискретные уровни энергии в соответствии с принципом Паули, образуя оболочки. Полностью заполненные оболочки – особо устойчивые структуры. («Магические числа» – 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126). Модель позволила объяснить спины основных и возбужденных состояний ядер.

6.3. Энергия связи ядра.

Масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Причина – сильное взаимодействие нуклонов в ядре.

- *Энергия связи ядра* – это величина, равная работе, которую надо совершить, чтобы разделить ядро на отдельные, не взаимодействующие, нуклоны.

$$E_{\text{св}} = c^2 \cdot \left\{ \left[Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n \right] - m_{\text{я}} \right\} \quad (6.1)$$

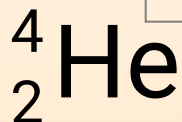
Дефект массы ядра:

$$\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n] - m_{\text{я}} \quad (6.2)$$

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 \quad (6.3)$$

Для решения задач:

$$\begin{aligned} \Delta m &= Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - (m_{\text{я}} + Zm_e) = \\ &= Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\alpha} \end{aligned} \quad (6.4)$$

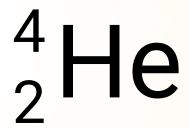


$$E_{\text{св}} = 931 \cdot (2 \cdot 1,00759 + 2 \cdot 1,00898 - 4,00260) = 28,4 \text{ МэВ}$$

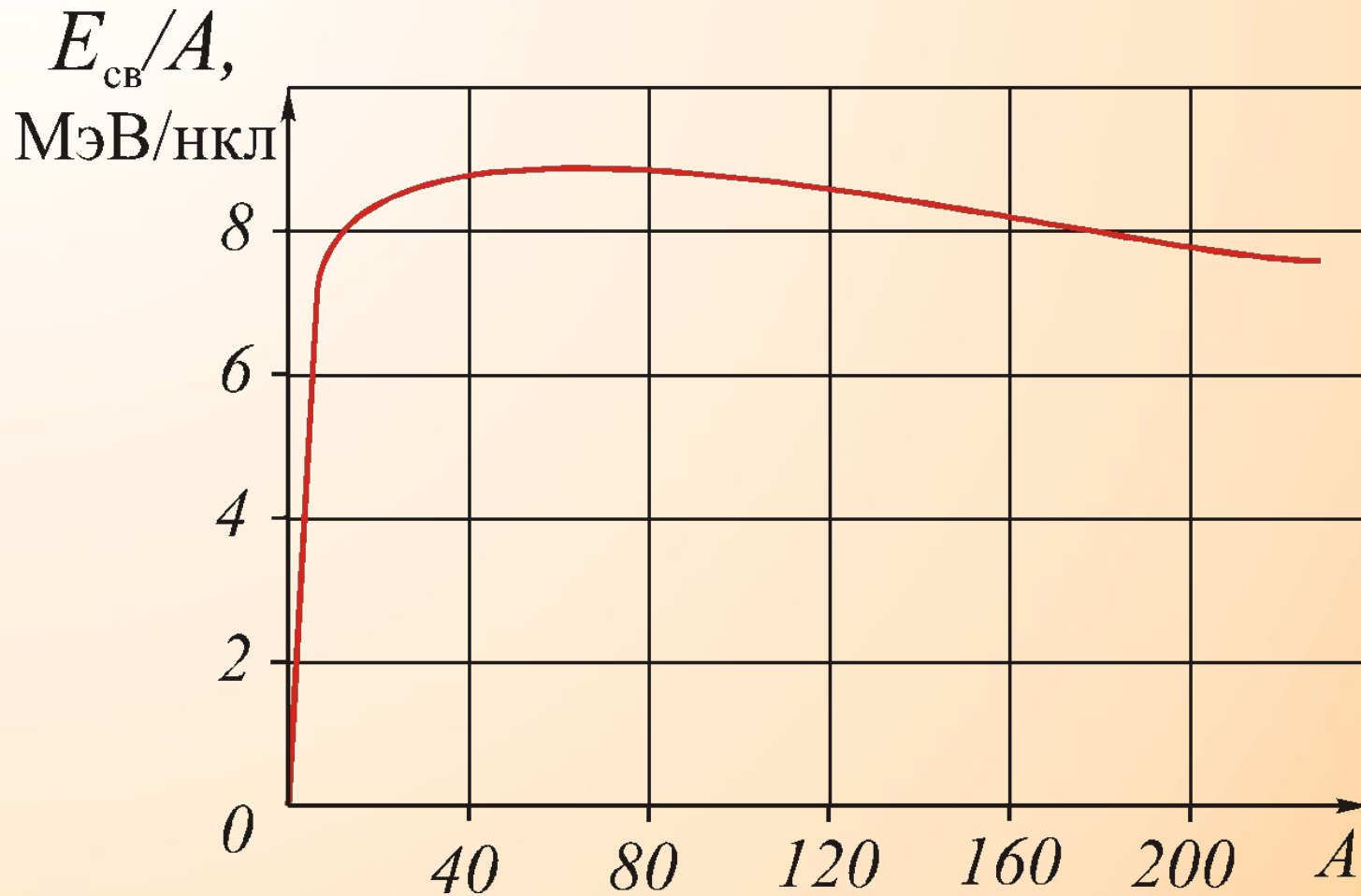
- ***Удельной энергией связи*** называется энергия связи, приходящаяся в среднем на один нуклон ($E_{\text{св}}/A$).

[МэВ/нуклон].

$(E_{\text{св}}/A)$ – характеризует устойчивость ядер: чем она больше, тем устойчивее ядро; зависит от A .
Максимальная энергия связи приходится на элементы с $A=50-60$.



$$E_{\text{св}}/A = 7,1 \text{ МэВ/нуклон}$$



Задача 6.1.

Определить дефект массы и энергию связи ядра ${}^{14}_7\text{N}$.
Какая энергия связи приходится на один нуклон?

Дано:

$$m_p = 1,00759 \text{ а.е.м.}$$

$$m_n = 1,00898 \text{ а.е.м.}$$

$$m_{\text{я}} = 14,0067 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m - ? \quad E_{\text{св}} - ? \quad E_{\text{св}}/A - ?$$

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

$$\Delta m = [7 \cdot m_p + 7 \cdot m_n] - m_{\text{я}} =$$

$$= 7 \cdot 1,00759 + 7 \cdot 1,00898 - 14,0067 =$$

$$= \underline{0,1093 \text{ а.е.м.}}$$

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = 0,1093 \cdot 931 = \underline{101,75 \text{ МэВ}}$$

$$E_{\text{св}}/A = 101,75/14 = \underline{7,27 \text{ МэВ/нкл}}$$

6.4. Радиоактивность.

● *Радиоактивностью* называется самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц.

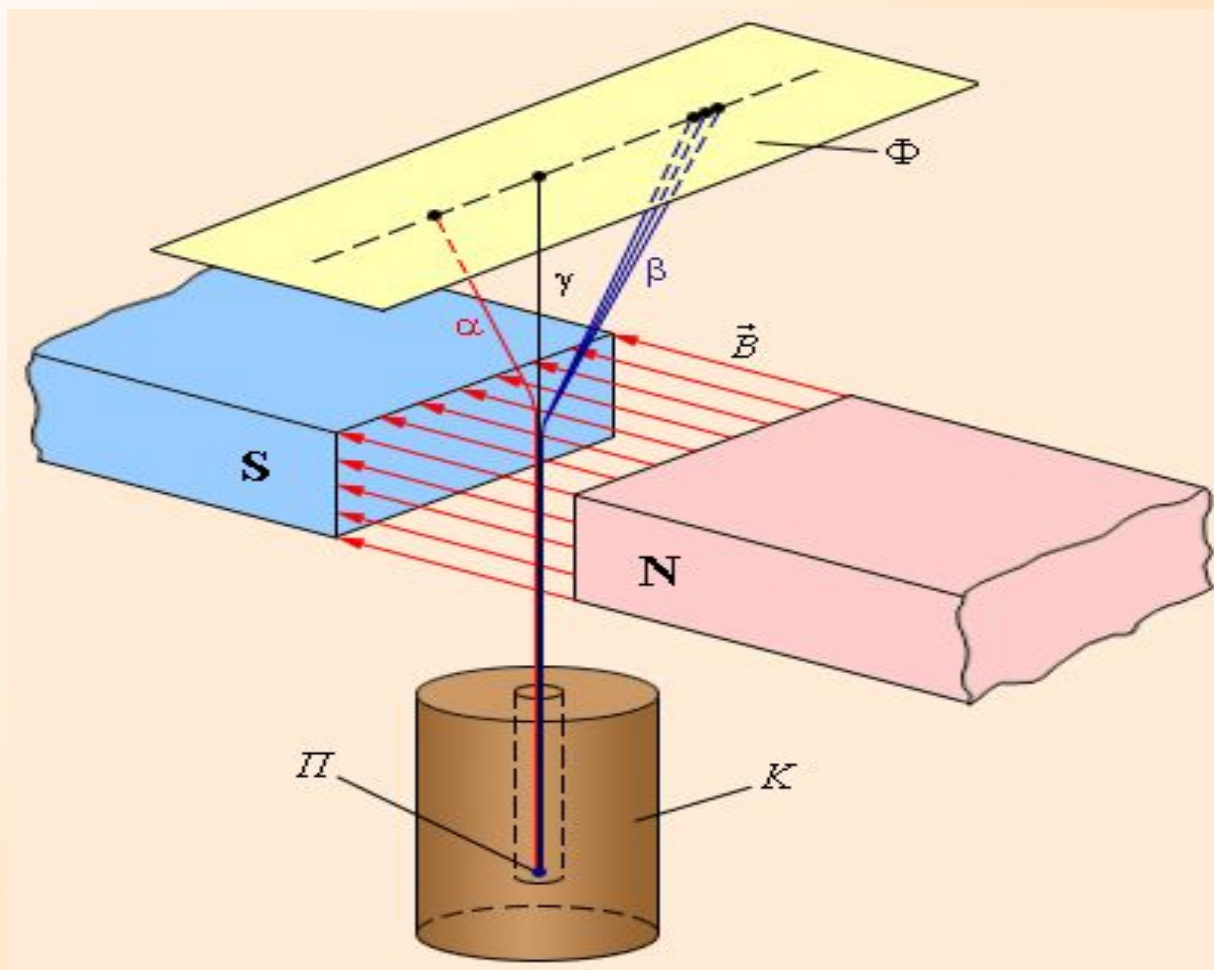
А.Беккерель, 1896г

Естественная радиоактивность наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе.

Искусственная радиоактивность наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций.

Виды распада: α -распад, β -распад, γ -излучение, спонтанное деление тяжелых ядер, протонная радиоактивность.

Схема опыта по обнаружению α -, β - и γ -излучений.
К – свинцовый контейнер, П – радиоактивный препарат,
Ф – фотопластинка, – магнитное поле.



dN – число ядер, распавшихся за время dt

$$dN = -\lambda N \cdot dt$$

λ – постоянная распада

Закон радиоактивного распада

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

(6.5)

N_0 – первоначальное число ядер

- Число ядер, распадающихся в единицу времени, называется *активностью* A .

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad (6.6)$$

СИ: 1 Бк (Беккерель) = 1 распад/с

Кюри (Ки).

1 Ки-это активность препарата изотопа радия-226 массой 1г.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

$$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (6.7)$$

Время, за которое распадается половина первоначального количества ядер, называется *периодом полураспада* $T_{1/2}$.

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

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (6.8)$$

$$T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ с} \div 5 \cdot 10^{15} \text{ лет.}$$

$${}_{92}^{238}\text{U} \quad 4,498 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

$${}_{12}^{27}\text{Mg} \quad 10 \text{ минут}$$

Среднее время жизни радиоактивного ядра:

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

(6.9)

Задача 6.2.

Определить, какая доля изотопа $^{225}_{89}\text{Ac}$ распадается в течение 6 суток.

Дано:

$t = 6$ суток

$T_{1/2} = 10$ суток

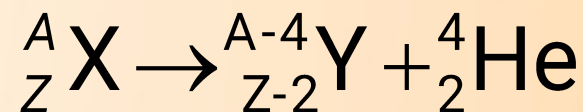
$\Delta N/N_0 = ?$

$$\begin{aligned}\Delta N &= N_0 - N = N_0 - N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = \\ &= N_0 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right)\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta N}{N_0} = 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 1 - 2^{-\frac{6}{10}} = 1 - 0,66 = \underline{0,34}$$

Основные типы радиоактивности:

1. α – распад.



2. β – распад ($\Delta Z = \pm 1$).

β^- – распад – испускание электрона.

β^+ – распад – испускание позитрона.

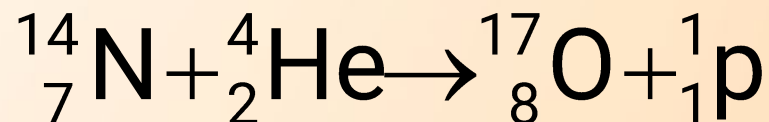
K – захват – захват ядром одного из электронов.

3. γ – распад.

6.5. Ядерные реакции.

- *Ядерными реакциями* называются реакции, при которых ядра одних химических элементов превращаются в ядра других химических элементов.

Резерфорд, 1919г.

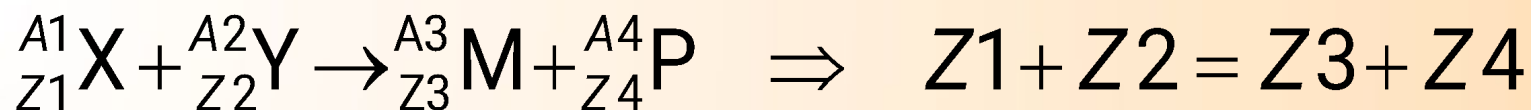


Закон сохранения зарядового числа:

- Сумма зарядовых чисел исходных ядер должна быть равна сумме зарядовых чисел продуктов реакции.

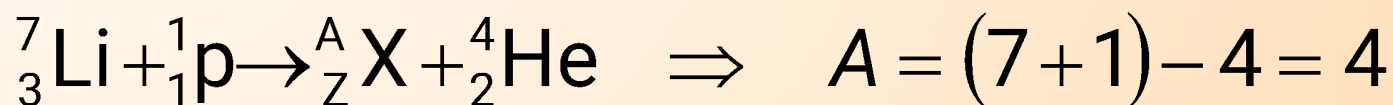
Закон сохранения массового числа:

- Сумма массовых чисел исходных ядер должна быть равна сумме массовых чисел продуктов реакции.

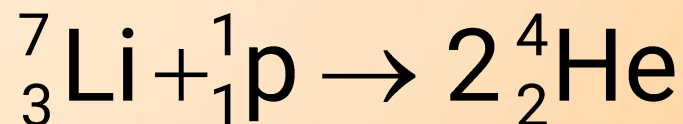
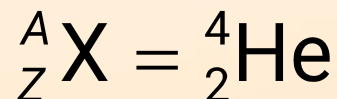


$$A1 + A2 = A3 + A4$$

Пример



$$Z = (3 + 1) - 2 = 2$$



Радиоуглеродный анализ

${}^{14}_6\text{C}$ – β – радиоактивен $T_{1/2} = 5730$ лет

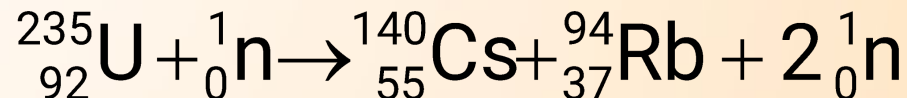
В разных местах Земли равновесная концентрация углерода-14 одинакова и соответствует 14 распадам в минуту на каждый грамм углерода.

В момент смерти организма концентрация углерода начинает убывать в соответствии с законом радиоактивного распада.

Измерив концентрацию углерода-14 в останках организма, можно определить дату их смерти (или возраст).

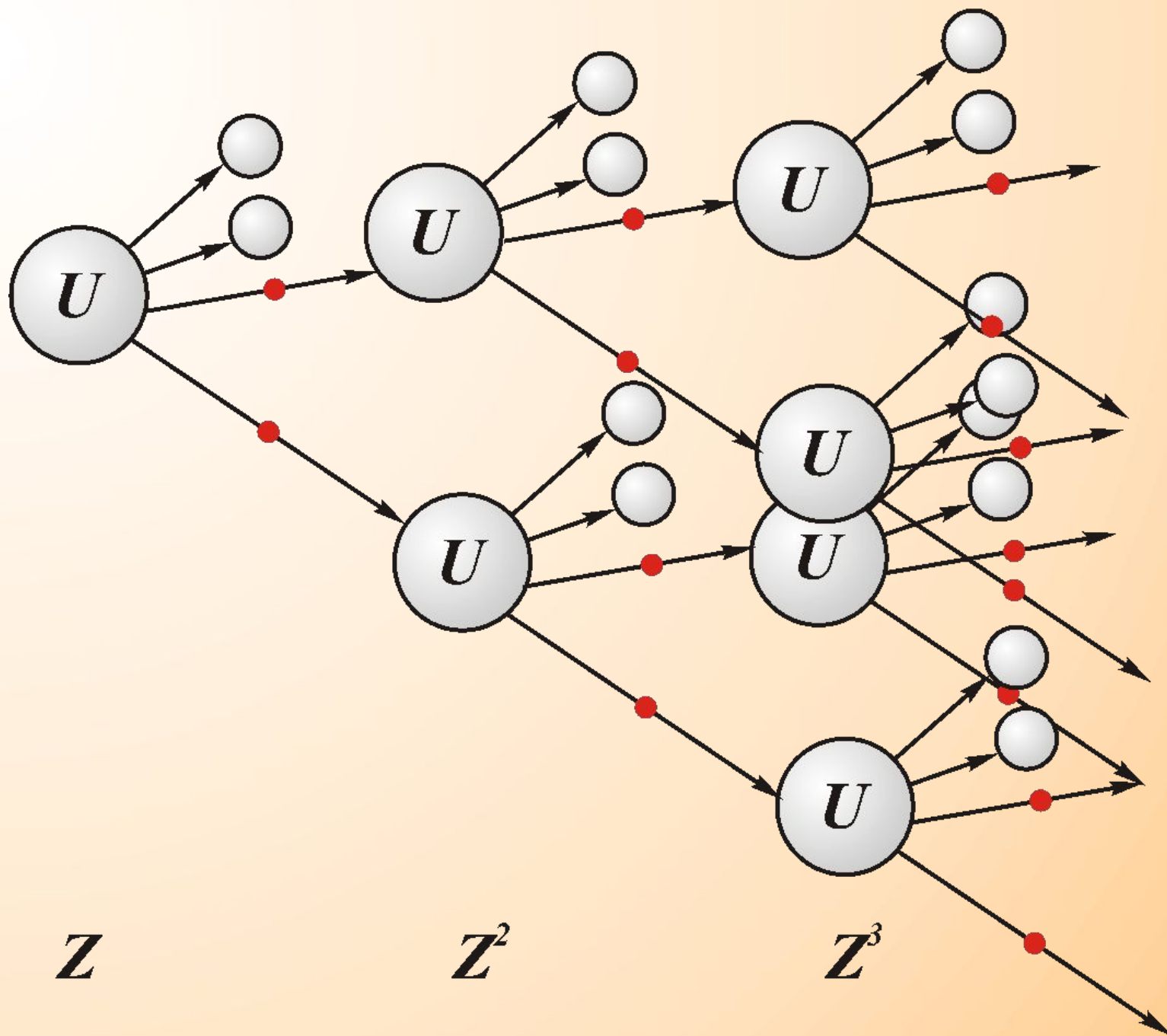
6.6. Цепная реакция деления.

1938г. О. Ган, Ф. Штрассман



Ядра ${}^{235}\text{U}$ и ${}^{239}\text{Pu}$ особенно хорошо делятся тепловыми нейтронами.

Ядра ${}^{238}\text{U}$ делятся только быстрыми (≥ 1 МэВ) нейтронами.



Природный уран: 99,27% ^{238}U , 0,72% ^{235}U , 0,01% ^{234}U , т.е. на одно ядро ^{235}U приходится 140 ядер ^{238}U .

В чистом ^{235}U каждый захваченный нейтрон вызывает деление ядра с испусканием в среднем 2,5 нейтронов.

Из-за высокой проникающей способности нейтронов часть из них покинет зону реакции, не поглотившись каким-либо ядром.

Если масса урана меньше критической – большинство нейтронов вылетает наружу.

Схематическое изображение атомной бомбы

1- ядерный заряд, 2 - запал,
3 - корпус бомбы

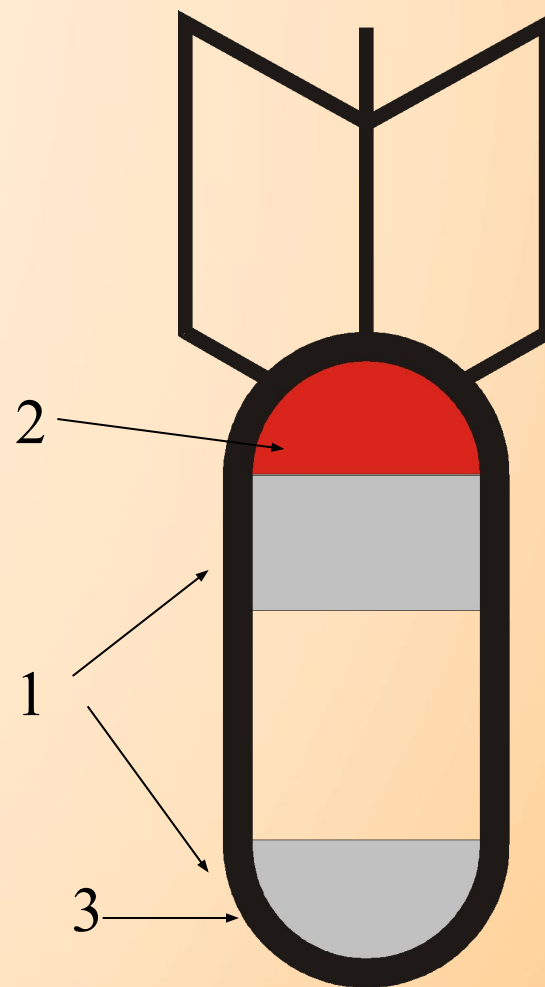
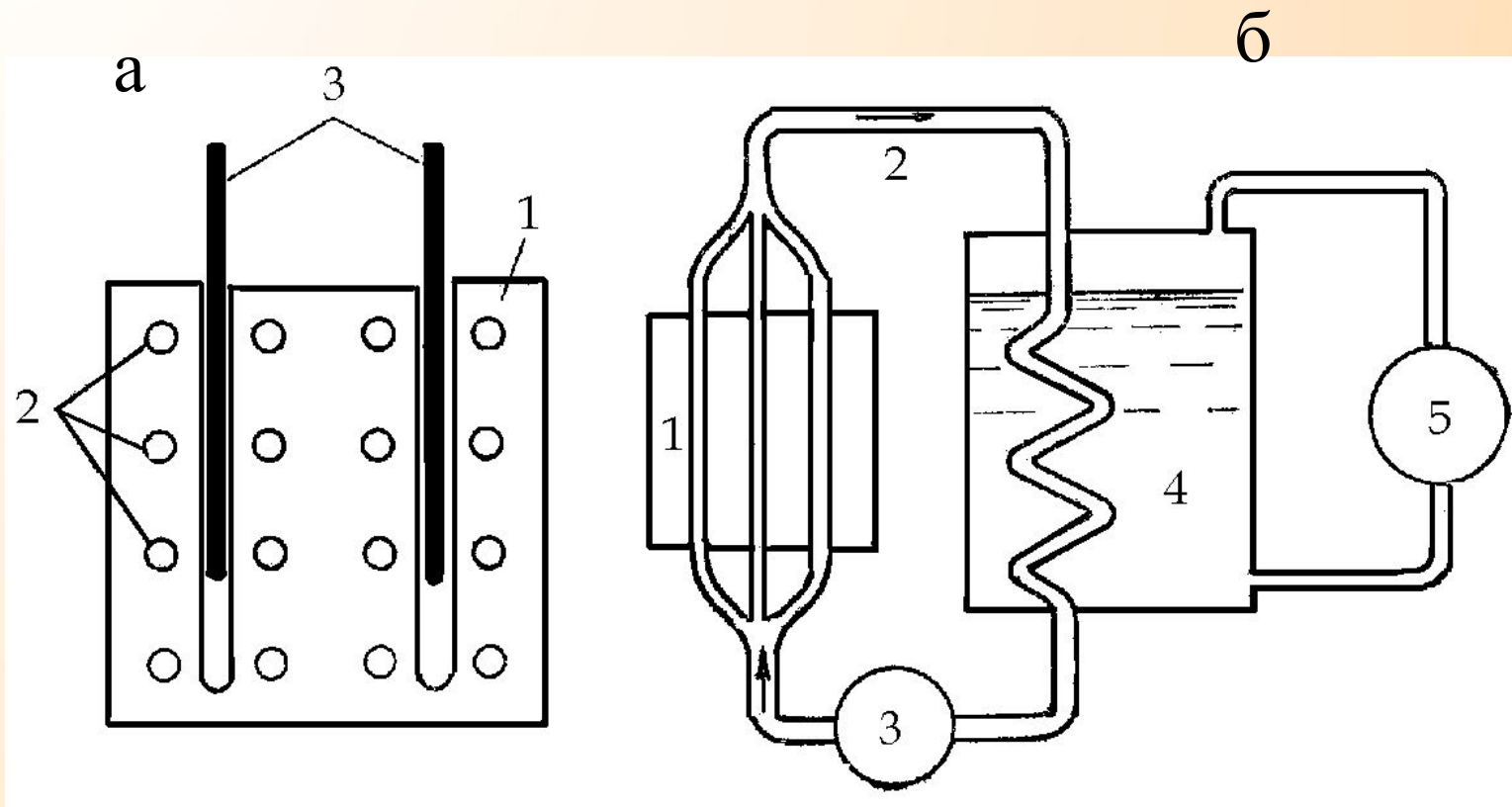


Схема уранового реактора (а) и атомной электростанции (б)

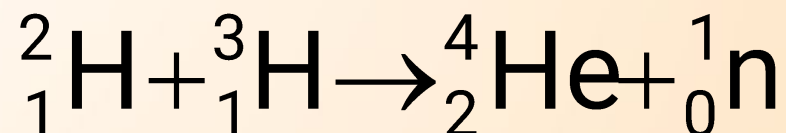


1-замедлитель нейтронов
(графит), 2-урановые блоки,
3-регулирующие стержни

1-активная зона реактора, 2-контур
для циркуляции теплоносителя,
3-насос, 4-теплообменник, 5-турбина

6.7. Термоядерные реакции.

- *Термоядерной реакцией* называется реакция синтеза ядер легких элементов в одно ядро.



$$\begin{aligned}\Delta m &= (3,01605 + 2,01410) - (4,00260 + 1,00867) = \\ &= 0,01888 \text{ а.е.м.}\end{aligned}$$

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 0,01888 \cdot 931 = 17,6 \text{ МэВ}$$

$$3,5 \text{ МэВ/нуклон} > 0,85 \text{ МэВ/нуклон}$$

Необходимо разгонять ядра до 0,35 МэВ, что соответствует $T = 2 \cdot 10^9$ К

Протон – протонная цепочка:



6.8. Элементарные частицы.

- Под термином «элементарные частицы» понимается общее название всех субатомных частиц, отличных от атомов и атомных ядер.

Элементарные частицы ведут себя как единое целое.

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

В настоящее время открыто несколько сотен частиц.

Систематика элементарных частиц:

По спину: бозоны – фотон, мезон;

фермионы – электрон, мюон, таон, протон, нейтрон, нейтрино.

По времени жизни τ :

Стабильные ($\tau \rightarrow \infty$) – фотон, электрон, протон, нейтрино.

Квазистабильные ($\tau > 10^{-20}$ с) – нейтрон и др.

Резонансы ($\tau \sim 10^{-23}$ с).

По характеру взаимодействий:

Переносчики взаимодействий – фотоны, W- и Z- бозоны, глюоны, «гравитоны».

Лептоны (слабое взаимодействие, $s = 1/2$) – мюоны, таоны, электроны, нейтрино.

Адроны (сильное взаимодействие) – мезоны, барионы.

Мезоны (целый спин) - π -, K - и η - мезоны, резонансы.

Барионы (полуцелый спин, масса не меньше массы протона) – нуклоны, гипероны, барионные резонансы.

Фотоны	Лептоны	Адроны		
		Мезоны	Барионы	
			Нуклоны	Гипероны
γ	e, μ, τ, ν	π, K, η резонансы	p, n	$\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ резонансы

Античастицы:

Античастица отличается от частицы только знаками зарядов (электрического, барионного, лептонного), масса, спин, время жизни у них одинаковые.

$B = +1$ (барионы) и -1 (антибарионы)

$L_e = L_\mu = L_\tau = +1$ для лептонов ($e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \tau^-, \nu_\tau$)
—1 для антилептонов ($e^+, \tilde{\nu}_e, \mu^+, \tilde{\nu}_\mu, \tau^+, \tilde{\nu}_\tau$)

- *Истинно нейтральными* называются частицы, у которых все свойства частиц и античастиц совпадают (фотон, π^0 -мезон, η^0 -мезон).

Аннигиляция:

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma$$

При превращениях элементарных частиц должны выполняться законы сохранения всех зарядов.

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

$$\nu_e + p \not\rightarrow e^{+} + n$$

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

$$\nu_{\mu} + p \not\rightarrow \mu^{+} + n$$

$$\tilde{\nu}_{\mu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$$

Кварковая модель адронов:

$$s = 1/2, B = 1/3$$

Кварк	Эл. заряд Q	Странность S	Шарм C	Красота b
u	$2/3$	0	0	0
d	$-1/3$	0	0	0
s	$-1/3$	-1	0	0
c	$2/3$	0	1	0
b	$-1/3$	0	0	1

Мезоны – пара кварк – антикварк. Барионы – три кварка.

$$\pi^+(0) \leftarrow u\bar{d}(\uparrow\downarrow) \qquad p(1/2) \leftarrow uud(\uparrow\downarrow\uparrow)$$