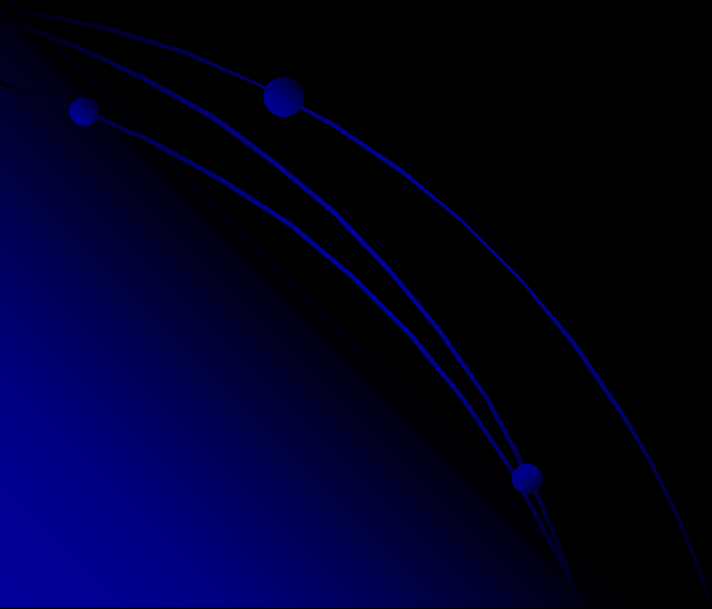


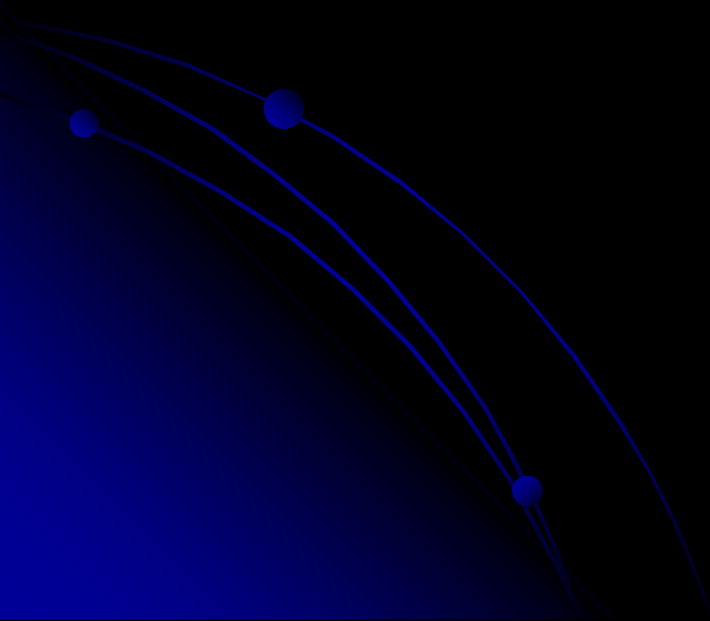
# Раздел 4

## Атомные ядра и элементарные частицы



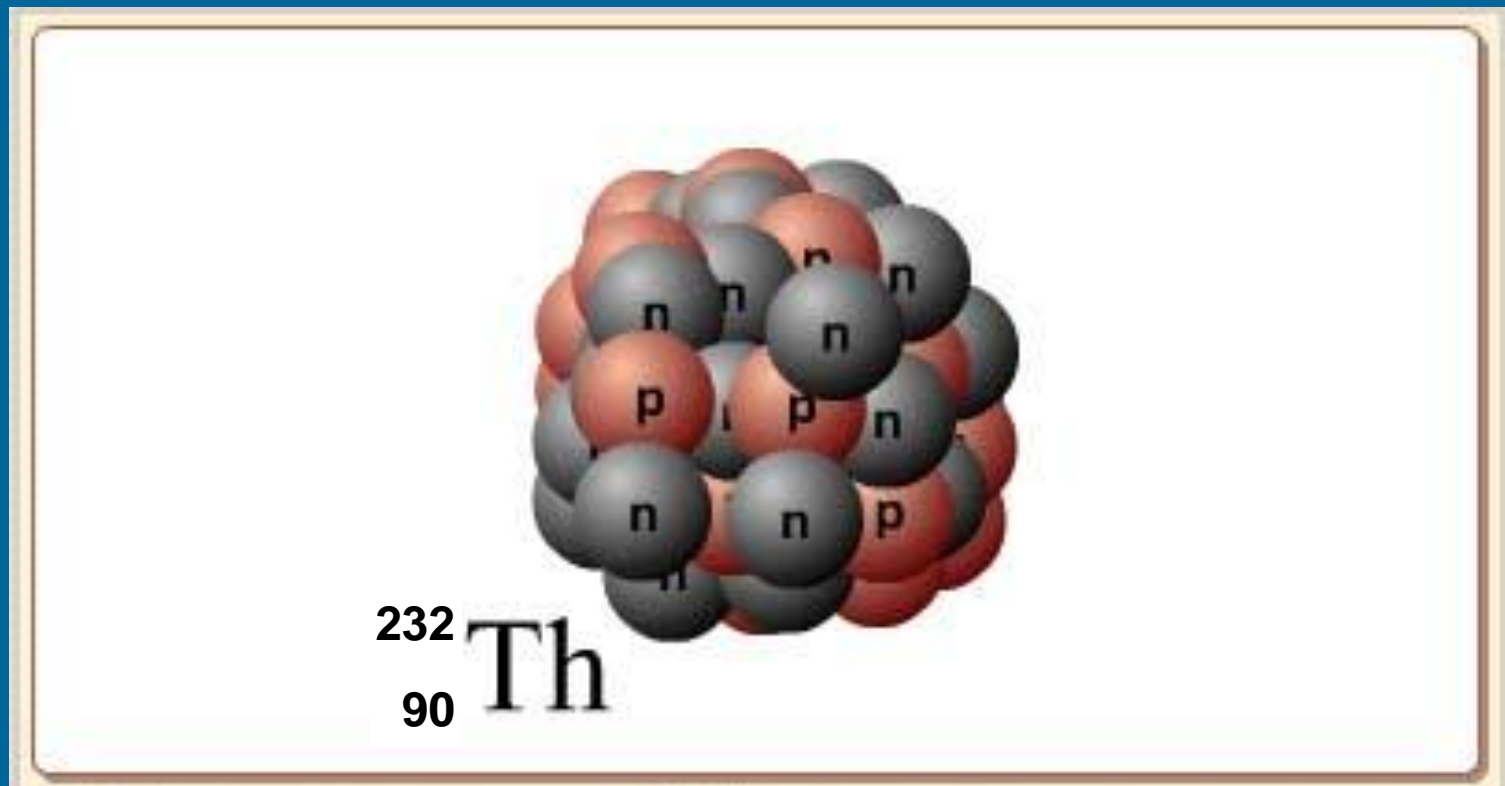
# Тема 1. Атомное ядро. Радиоактивность

- 1.1. Строение ядра. Размеры ядер.  
Модели ядра



# Протонно-нейтронная модель ядра Иваненко и Гейзенберг 1932 г.

Пример: Модель 6.7. (ядро атома тория)



## Свойства нуклонов

Протон 

масса покоя  $m_p = 1836m_e$

спин  $s = 1/2$

магнитный момент  $\mu_p = 2,79\mu_j$

$$\mu_j = \frac{e\hbar}{2m_p} = \frac{\mu_B}{1836} \text{ — ядерный магнетон}$$

(магнетон Бора  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ )

Нейтрон 

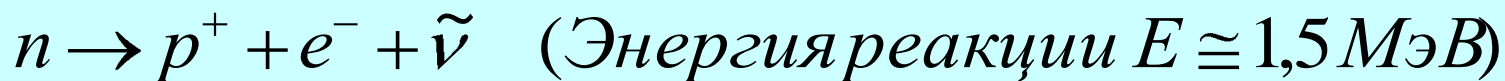
масса покоя:  $m_n - m_p = 2,5m_e$

спин  $s = 1/2$

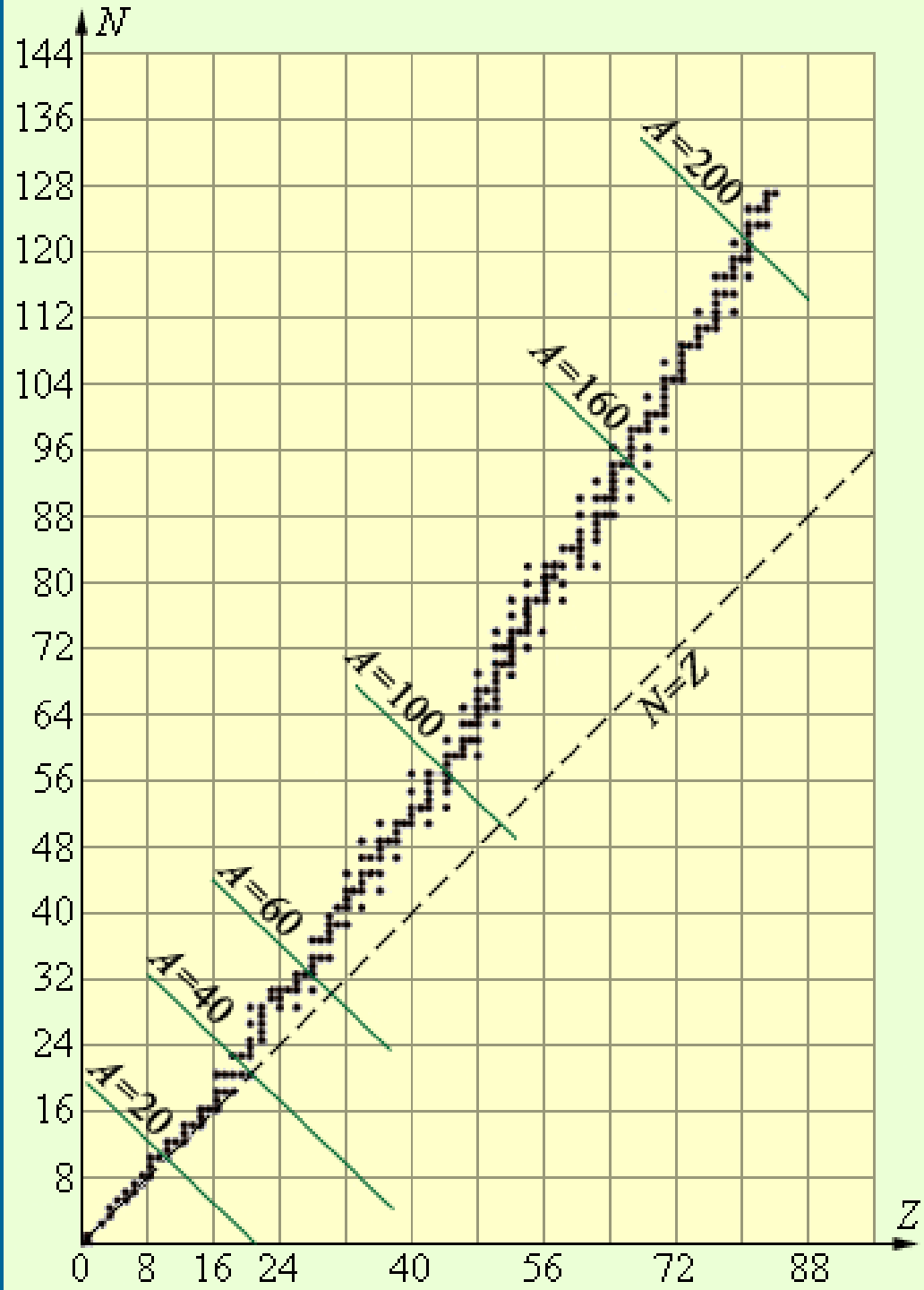
магнитный момент  $\mu_n = -1,91\mu_j$  (!)

Знак "—" означает что направления момента импульса и магнитного момента противоположны

Нейтрон в свободном состоянии нестабилен ( $T = 12$  мин.):



Числа протонов  
и нейтронов  
в стабильных ядрах



Массовое число ядра (число нуклонов в ядре):

$$A = Z + N$$

$Z$  – число 

$N$  – число 

$Z$  – зарядовое число (порядковый номер элемента в таблице Менделеева)

$Z = 43, 61, 93, 95-107$  – искусственные

Символьное обозначение ядра:  ${}^A_Z X$  или  ${}_Z X^A$

Например  ${}_6 C^{12}$ ;  ${}_{26}^{56} Fe$ ;  ${}_{92}^{238} U$

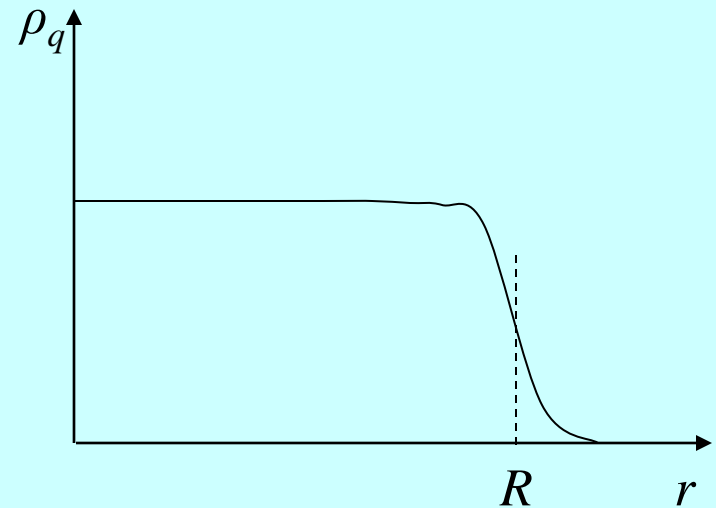
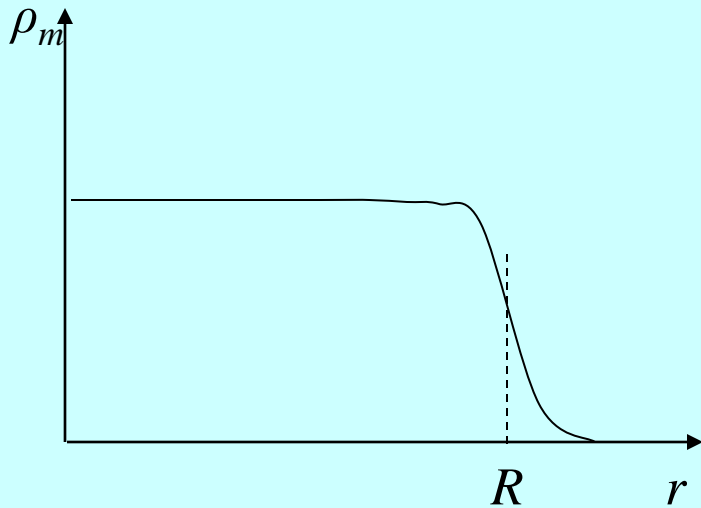
Изотопы – ядра с одинаковыми  $Z$ . Например:  $\left\{ \begin{array}{l} {}^1_1 H - \text{протий} \\ {}^2_1 H - \text{дейтерий} \\ {}^3_1 H - \text{тритий} \end{array} \right.$

# Размеры ядер

Плотность ядерного вещества  $\rho = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$

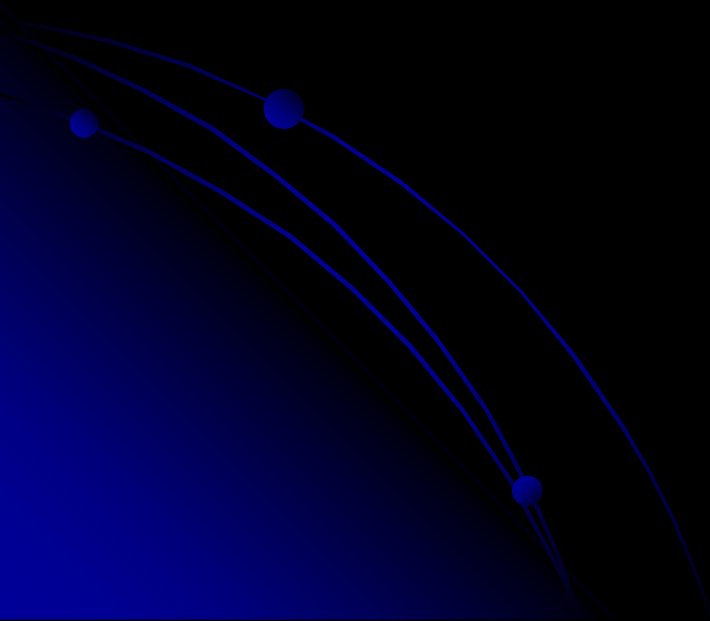
$$R = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м}$$

$10^{-15} \text{ м} = 1 \text{ фм} = 1 \text{ Фм}$  (ферми)



# Модели атомного ядра:

- Капельная (Я.И. Френкель – 1939 г.)
- Оболочечная ( Мария Гёпперт-Майер)





# Оболочечная модель ядра

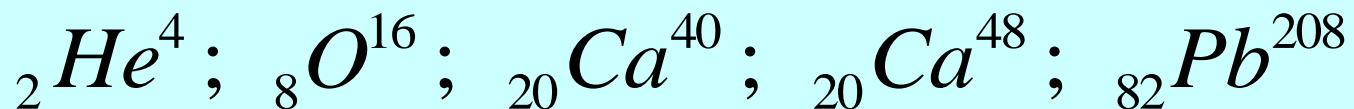


Магические числа:  
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Магические ядра:  
 $Z = \text{маг}$  или  $N = \text{маг}$   
(особо устойчивые ядра)

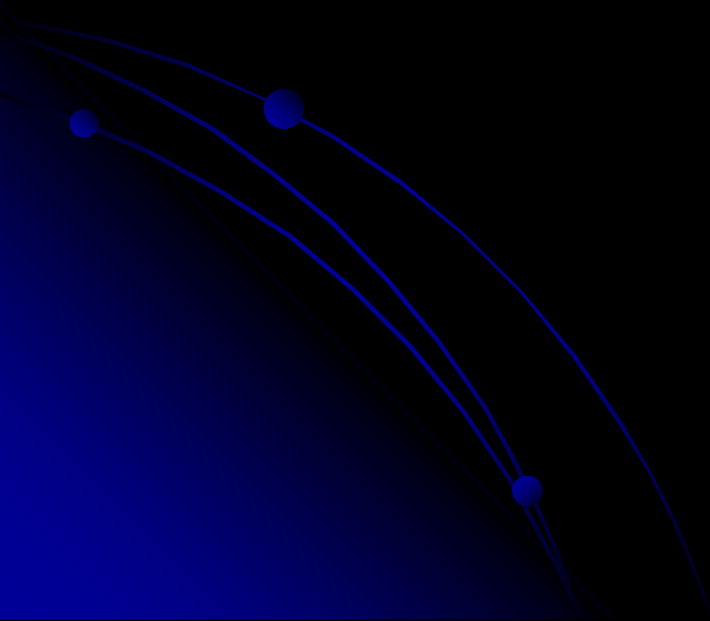
Дважды магические ядра:  
 $Z = \text{маг}$  и  $N = \text{маг}$   
(супер устойчивые ядра)

Дважды магические ядра:

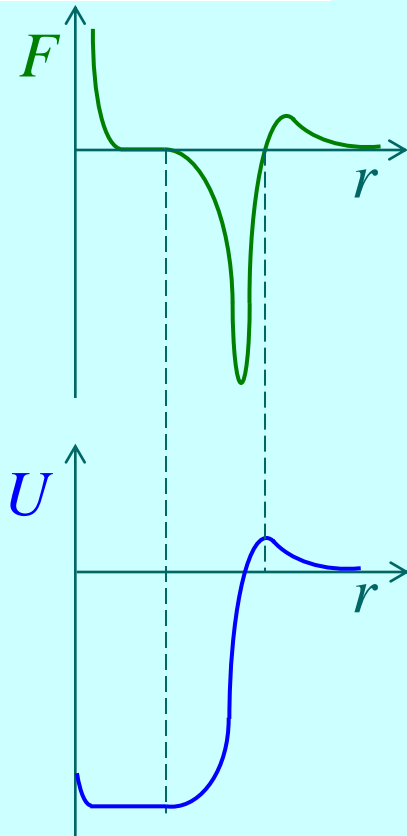
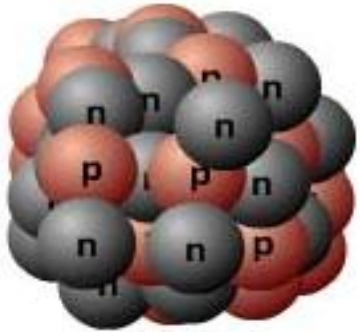


# Тема 1. Атомное ядро. Радиоактивность

- 1.1. Строение ядра. Размеры ядер.  
Модели ядра
- 1.2. Ядерные силы



# Свойства сильного ядерного взаимодействия



1. Короткодействие ( $r \leq 10^{-15}$  м)
2. Зарядовая независимость
3. Насыщенность (каждый нуклон взаимодействует лишь с ближайшими нуклонами)
4. Зависимость от ориентации спина (например, дейтрон образуется из протона и нейтрона с параллельными спинами)
5. Нецентральность

У ядерных сил  $r_{\text{вз}} \leq 10^{-15} \text{ м}$

Юкава (1935 г.):

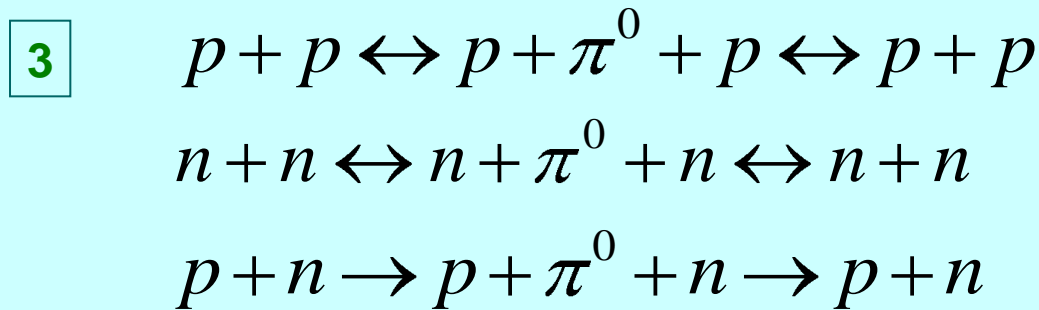
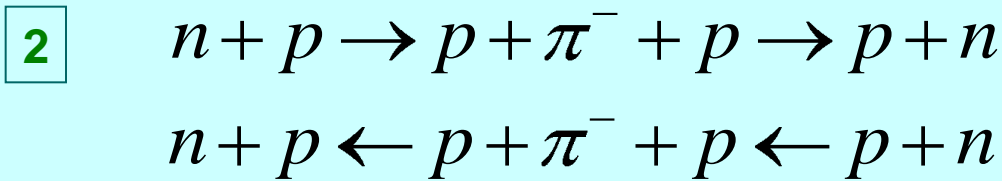
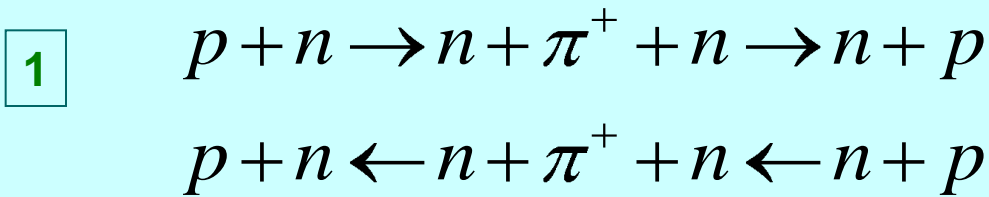
$$m_{\text{обм}} \sim (200-300) m_e$$

МЕЗОН

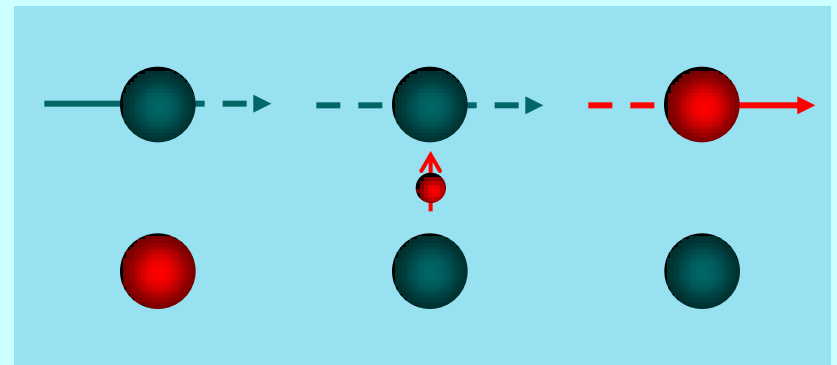


**Юкава Хидэки**  
(23.I.1907–8.IX.1981).

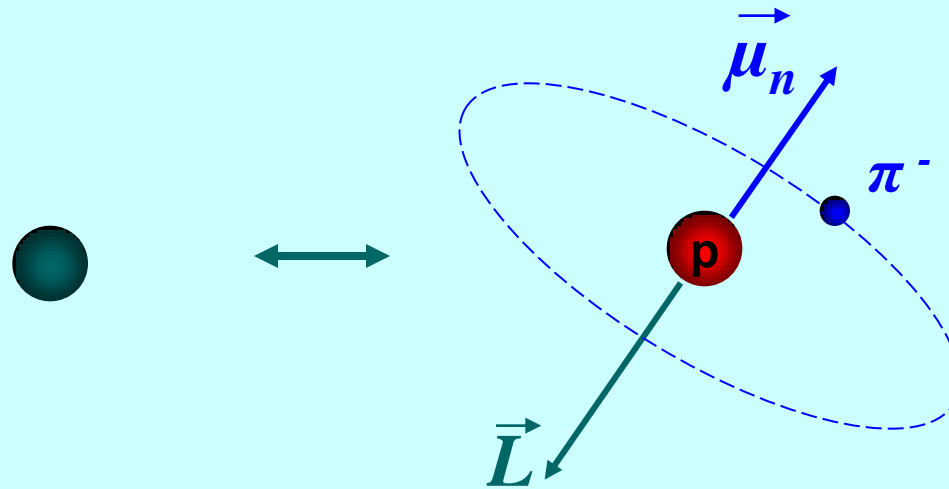
# Схемы обменного взаимодействия между нуклонами



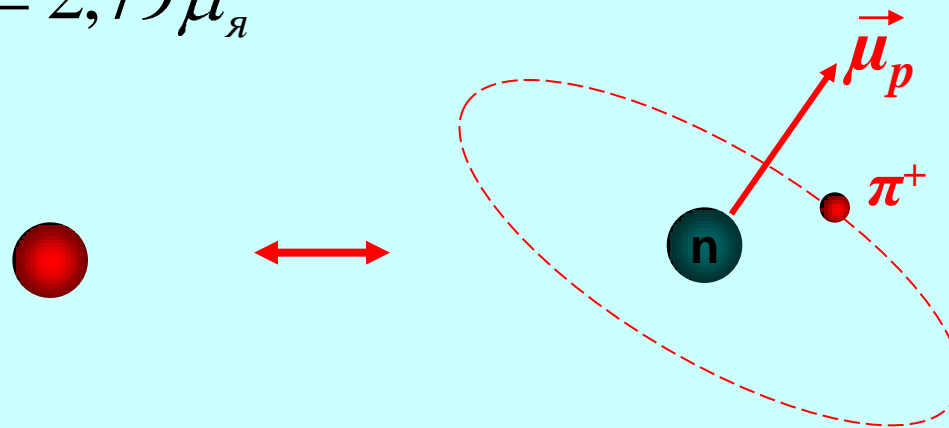
Экспериментальное  
наблюдение обменного  
взаимодействия нуклонов



Магнитный момент нейтрона  $\mu_n = -1,91\mu_y$  (!)

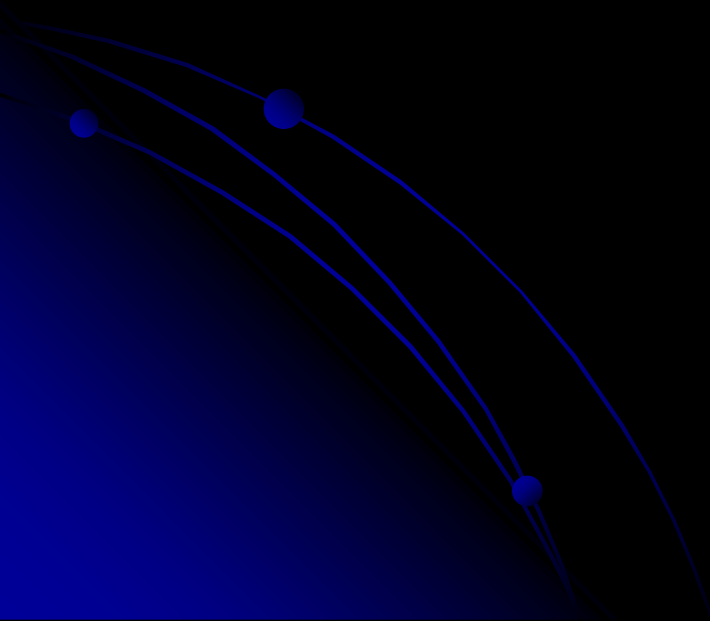


Аномально высокий магнитный момент протона  
 $\mu_p = 2,79\mu_y$



# Тема 1. Атомное ядро. Радиоактивность

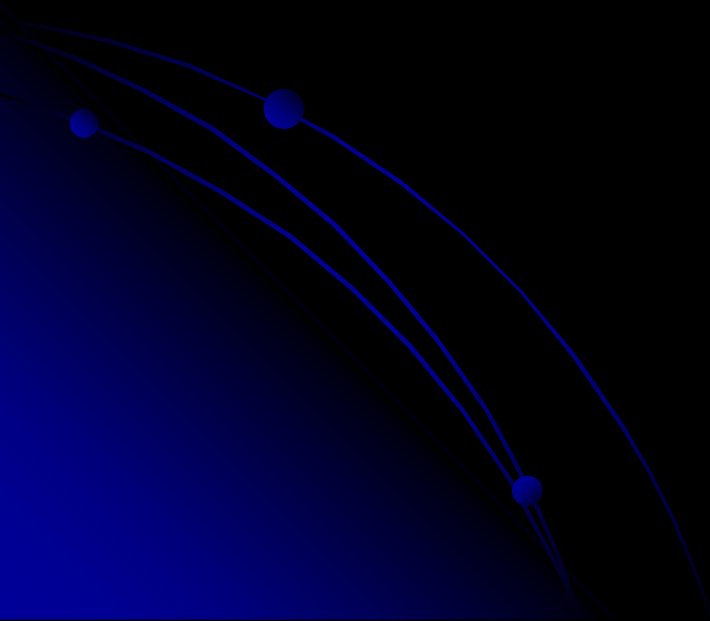
- 1.2. Ядерные силы
- 1.3. Энергия связи ядер



# Дейтон

$$m_p + m_n - m_d = 2,22$$

МэВ

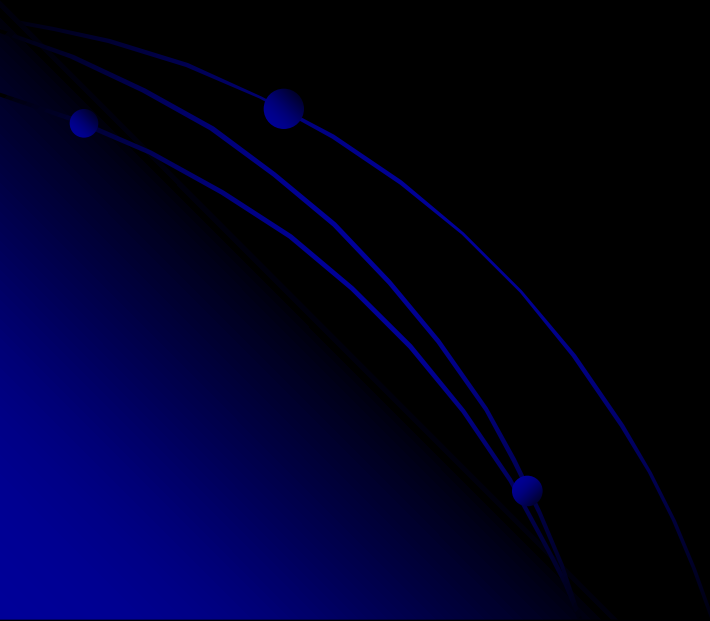




Гелий



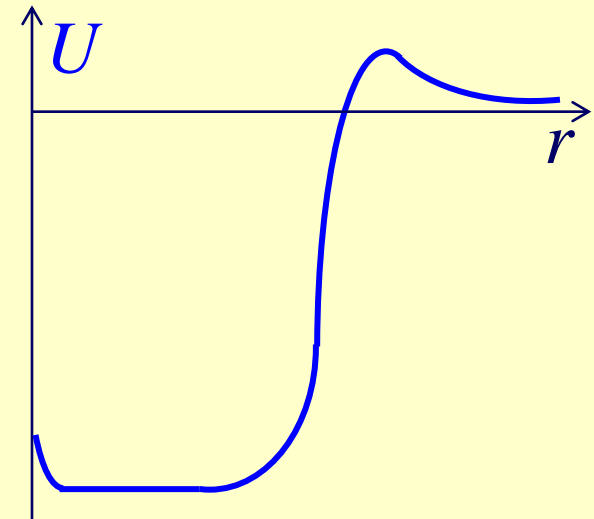
$$2m_p + 2m_n - m_{\text{я}} = 28,4 \text{ МэВ}$$



Масса ядра всегда меньше  
суммы масс входящих в него  
нуклонов:

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

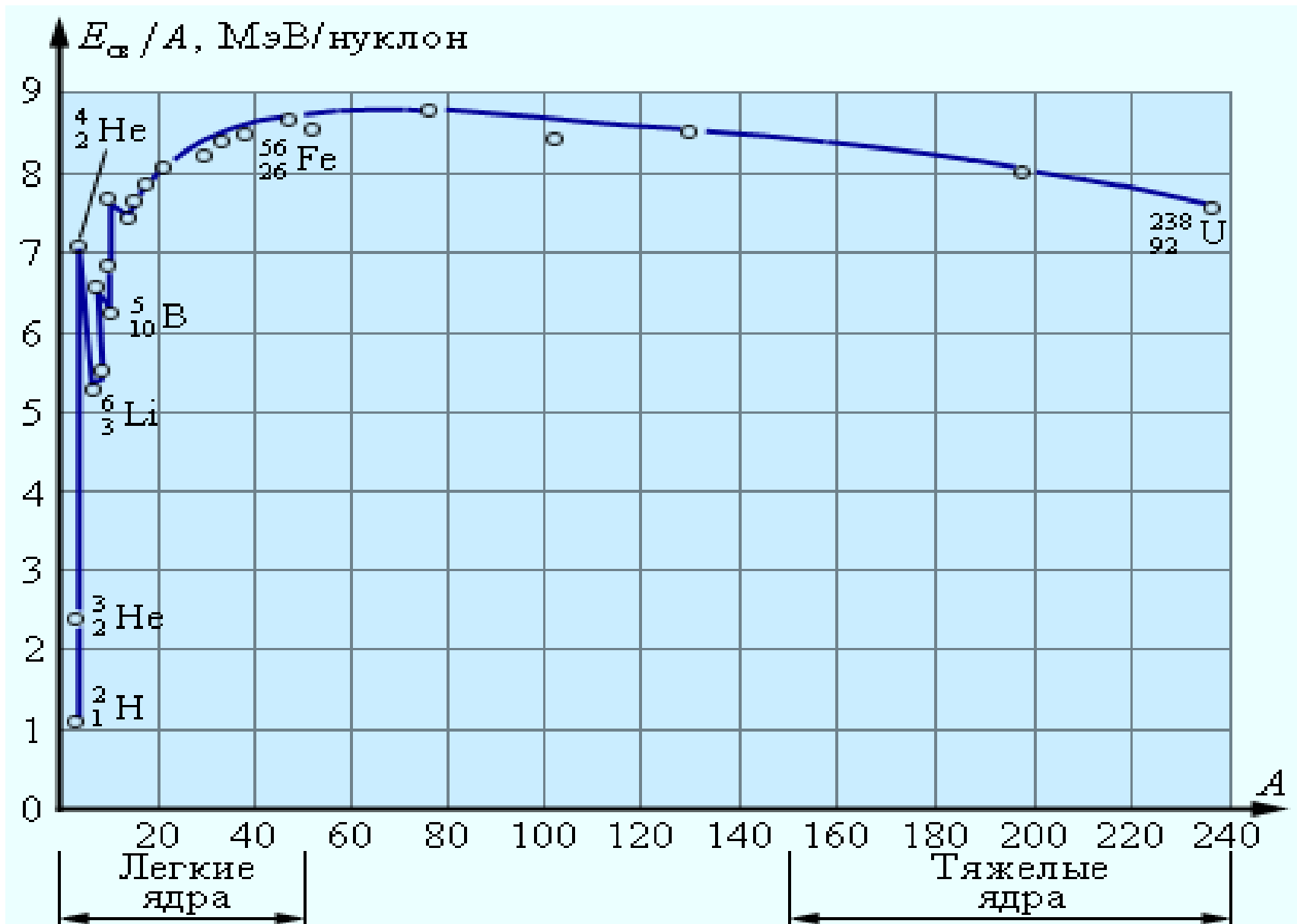
*дефект массы ядра*



## Энергия связи ядра

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

# Удельная энергия связи ядер.



# Формула Вейцзеккера

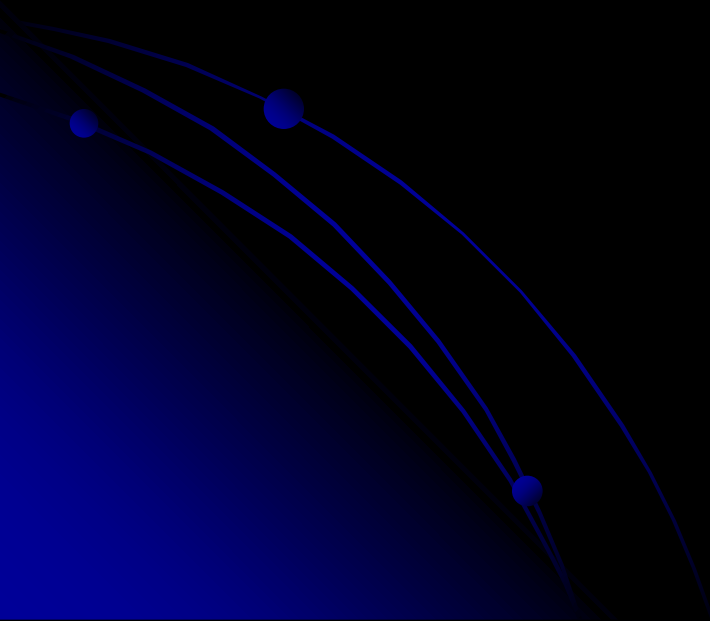
$$E_{\text{св}} = C_{\text{об}} A - C_{\text{пов}} A^{\frac{2}{3}} - C_{\text{кул}} Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - C_{\text{сим}} \frac{N - Z^2}{A} + C_{\text{сп}} A^{-\frac{3}{4}} \delta$$

- $C_{\text{об}}$  – энергия связи короткодействующими ядерными силами,
- $C_{\text{пов}}$  – уменьшение энергии связи вследствие ненасыщенности связей поверхностных нуклонов,
- $C_{\text{кул}}$  – уменьшение энергии связи из-за кулоновского отталкивания,
- $C_{\text{сим}}$  – энергия симметрии, т.е. уменьшение энергии при отклонении от равенства  $N = Z$ ,
- $C_{\text{сп}}$  – изменение энергии связи, связанное со спариванием одинаковых нуклонов в ядре, т.е. объединением в пары, как протонов, так и нейтронов,

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{для чётно - чётных ядер (чётное } N \text{ и чётное } Z), \\ 0 & \text{для ядер атомов с нечётным } A, \\ -1 & \text{для нечётно - нечётных ядер (нечётные } N \text{ и } Z). \end{cases}$$

# Тема 1. Атомное ядро. Радиоактивность

- 1.3. Энергия связи ядер
- 1.4. Радиоактивность



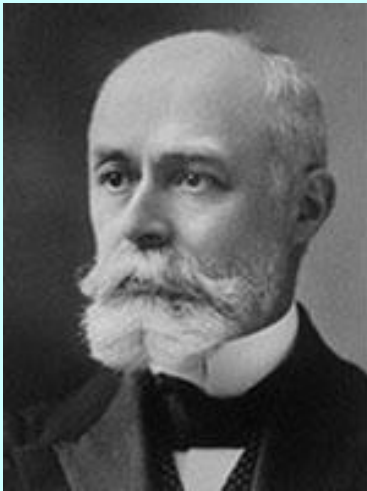
# Определение:

Радиоактивностью называется свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав (заряд, массовое число).

При этом испускаются элементарные частицы или ядерные фрагменты.

# Радиоактивность

1.  $\alpha$  – распад,
2.  $\beta$  – распад,
3.  $\gamma$  – излучение ядер,
4. спонтанное деление тяжелых ядер,
5. протонная радиоактивность



**Беккерель (Becquerel)**  
Антуан Анри  
(15.XII.1852–25.VIII.1908)

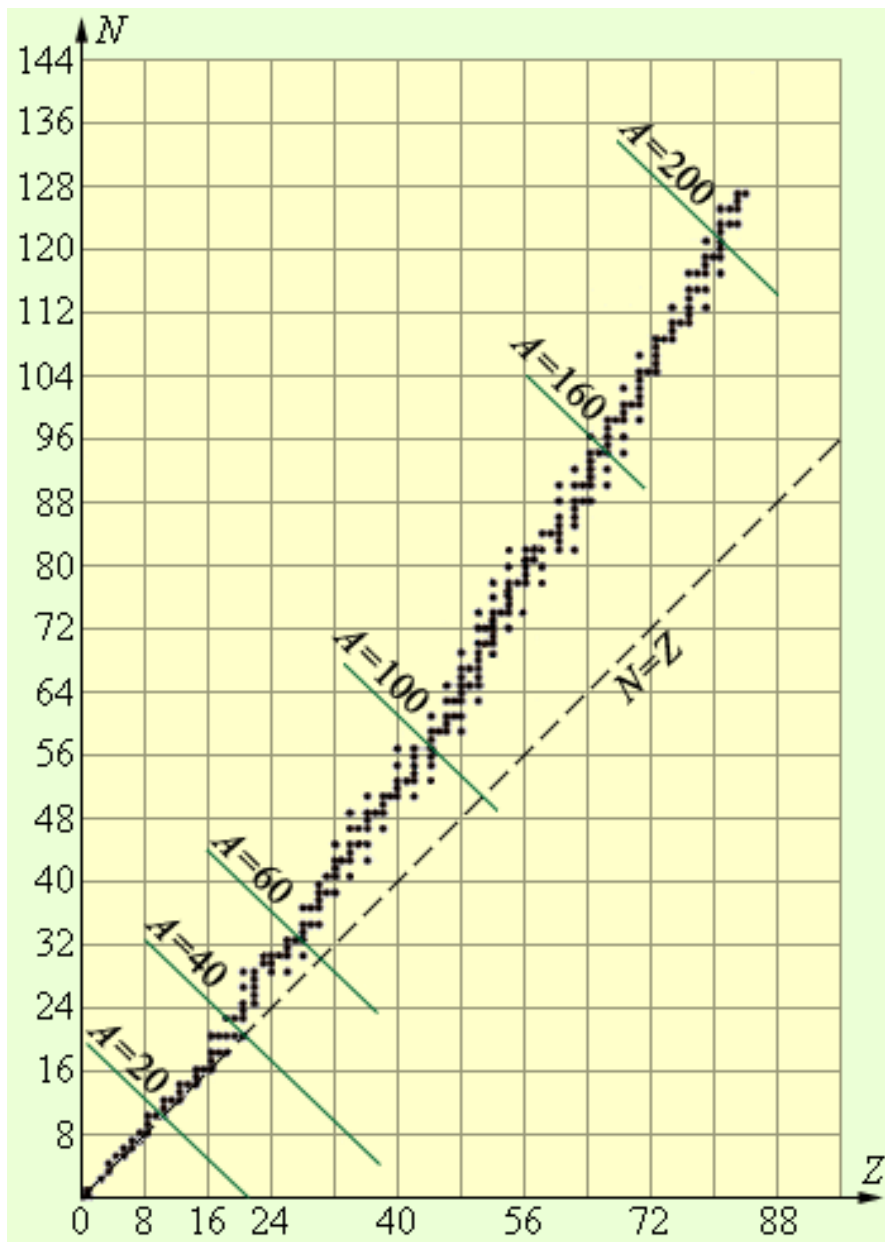


**Кюри (Curie)**  
Пьер  
(15.V.1859–19.IV.1906)



**Склодовская-Кюри (Skłodowska-Curie)**  
Мария  
(7.XI.1867–4.VII.1934)

# Числа протонов и нейтронов в стабильных ядрах





# Модели ядерных превращений



$^{234}\text{Th}$

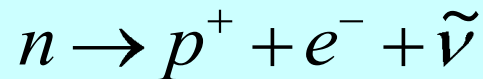
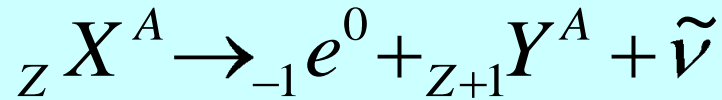
- Альфа-распад
- Бета-распад
- Гамма-распад
- Деление ядра
- Ядерный синтез
- Испускание электрона
- Испускание позитрона
- Захват электрона

Старт

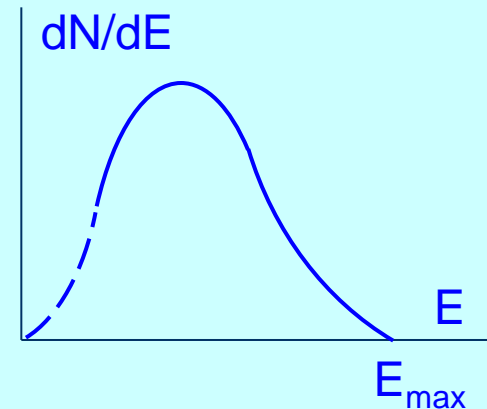
Обр.

# Разновидности $\beta$ - распада

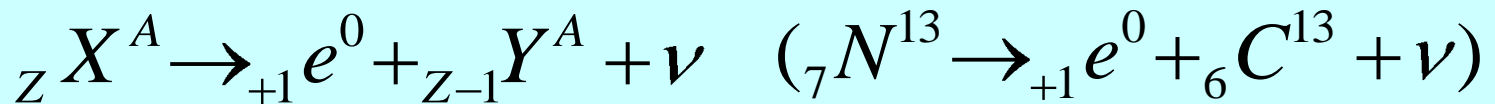
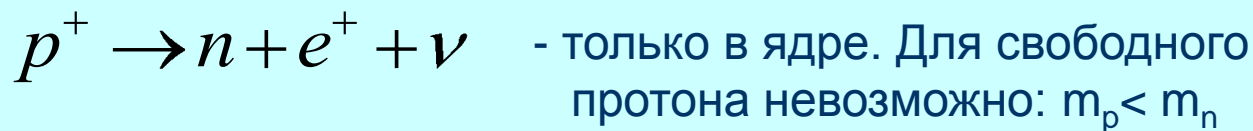
## 1. Испускание электронов



Для сохранения спина  $s_\nu = 1/2$

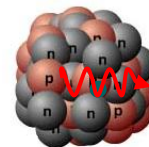
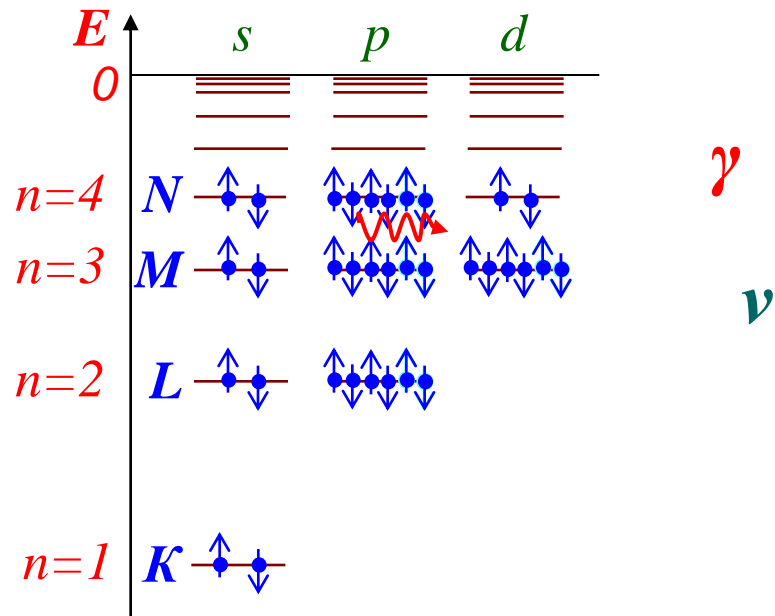
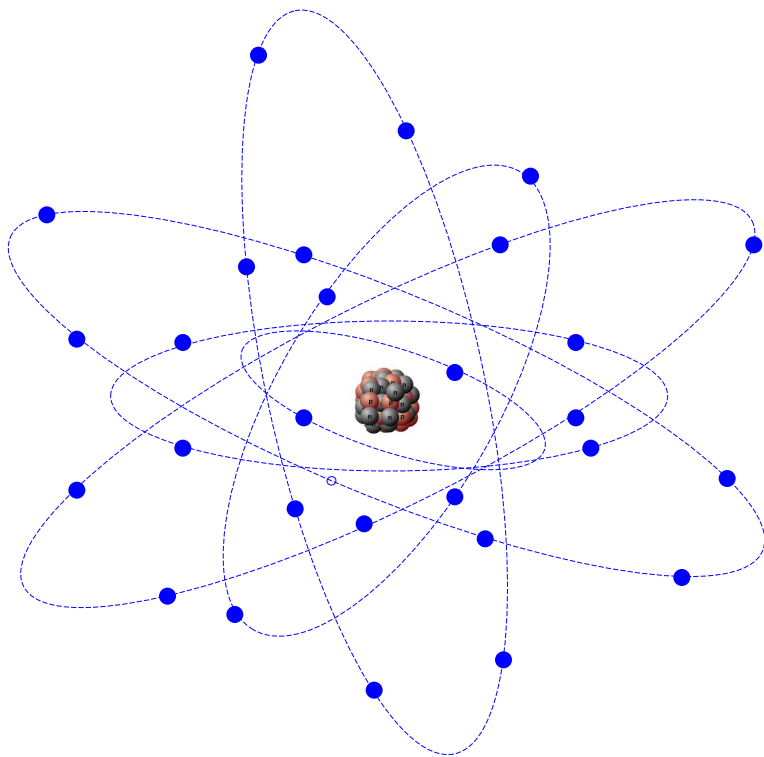
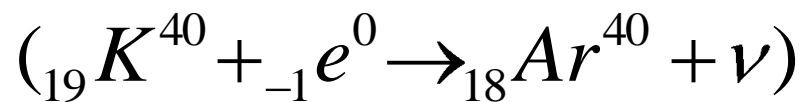


## 2. Испускание позитронов



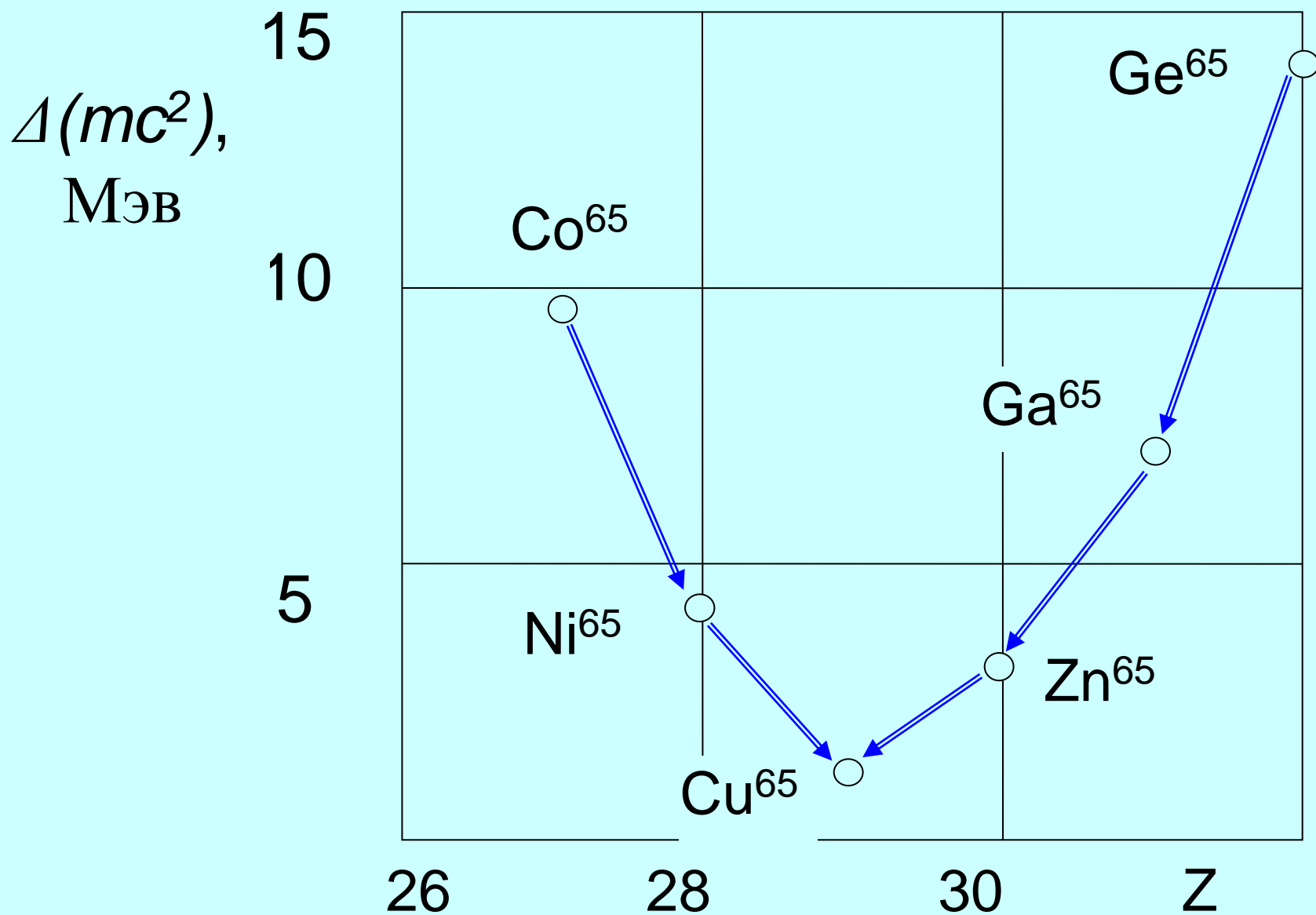
### 3. электронный захват (e – захват) $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu$

$${}_Z X^A + {}_{-1} e^0 \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + \nu$$

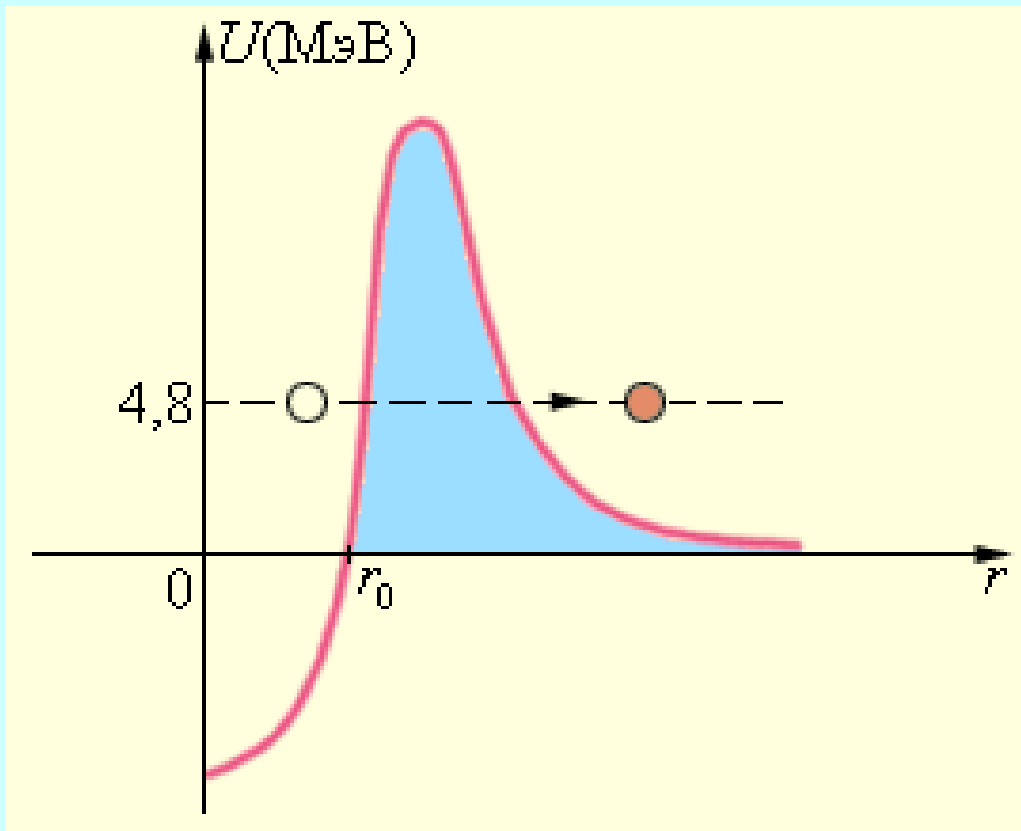


$\gamma$

# $\beta^-$ и $\beta^+$ распад ядер с $A = 65$



# $\alpha$ - распад



Условие для  
туннелирования:

$$E_\alpha > 0$$

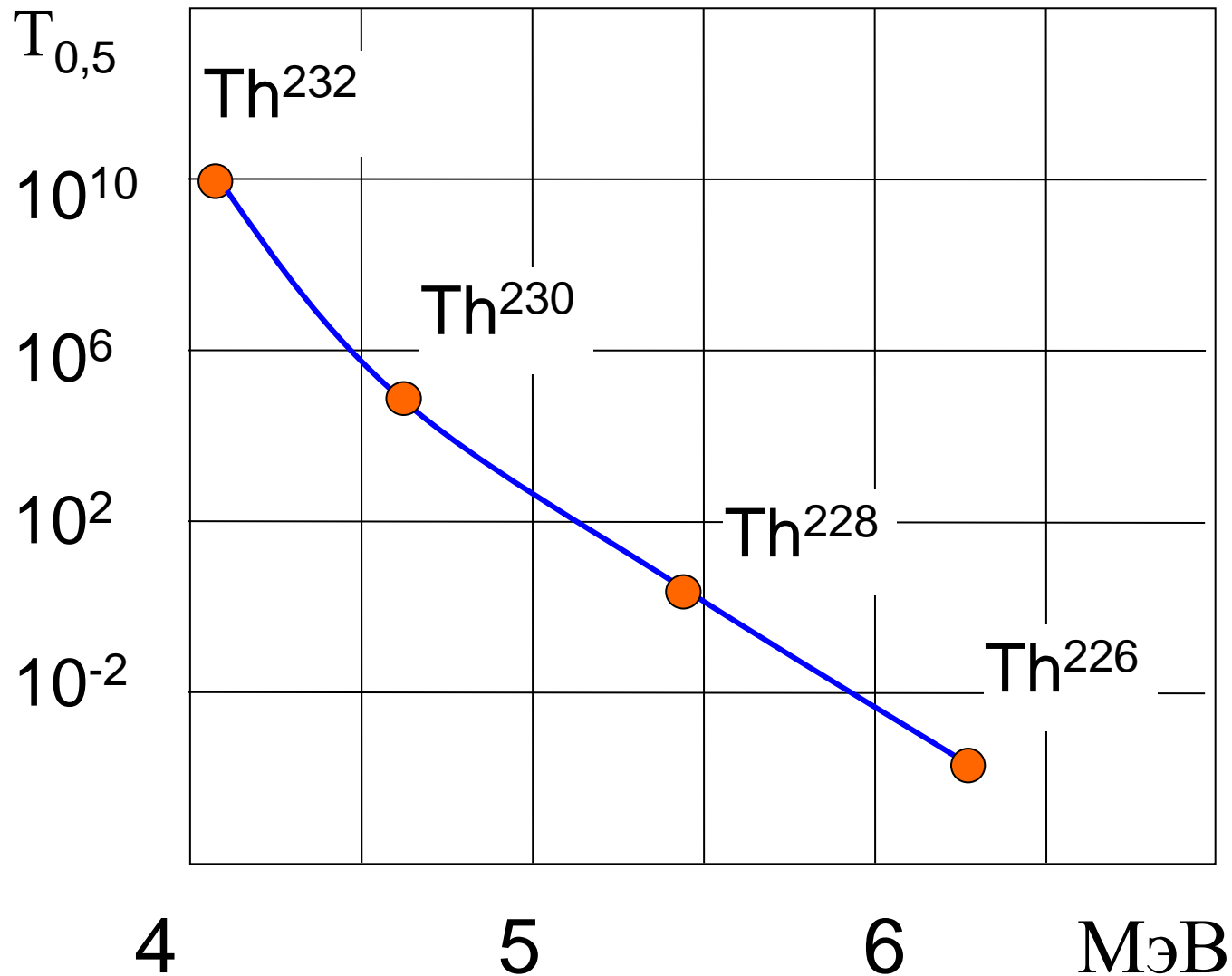
$$Z > 82$$

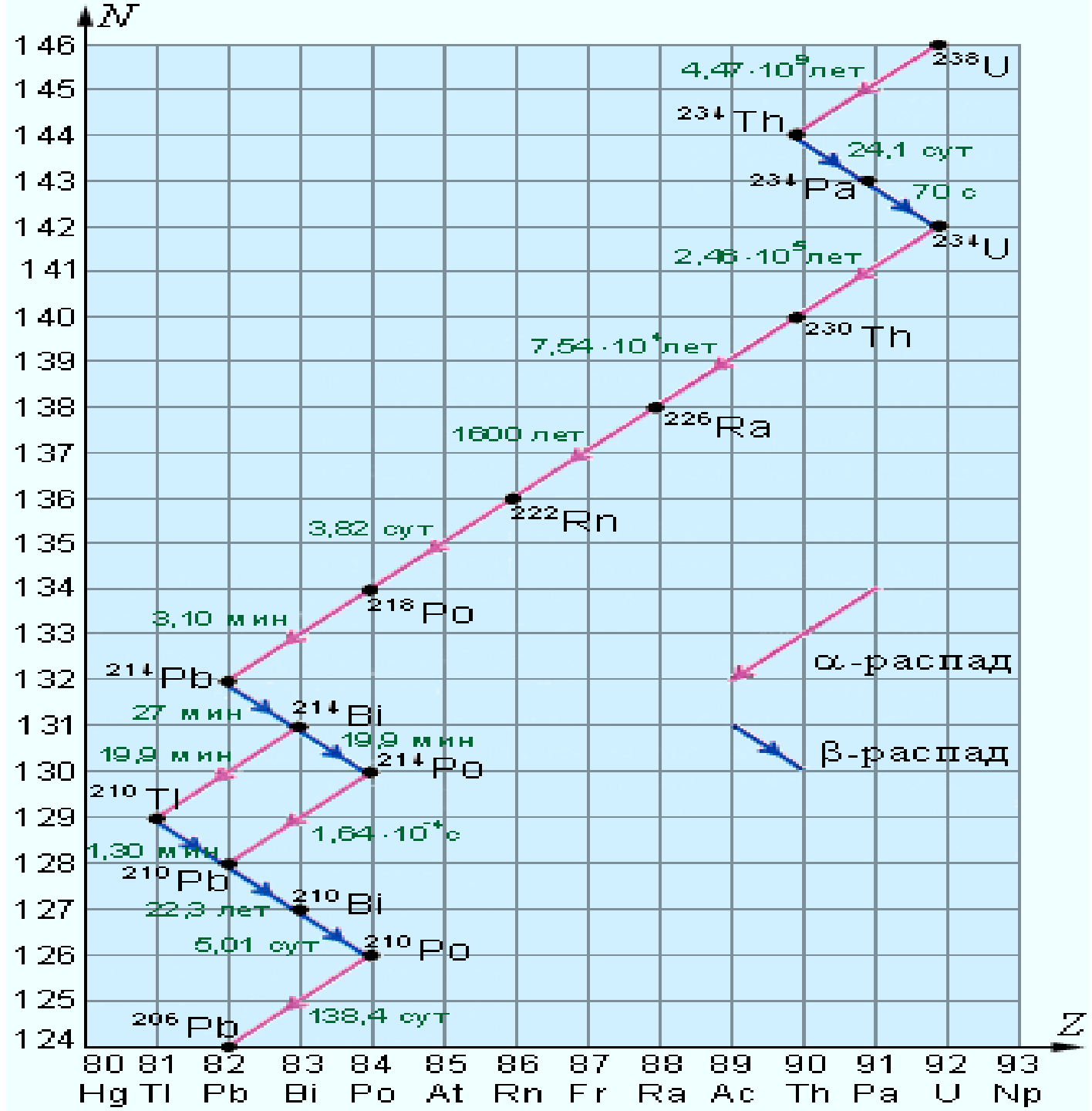
${}_{82} Pb^{207}$  – свинец

При  $Z > 92$

$$T_\alpha \ll T_{\text{земли}}$$

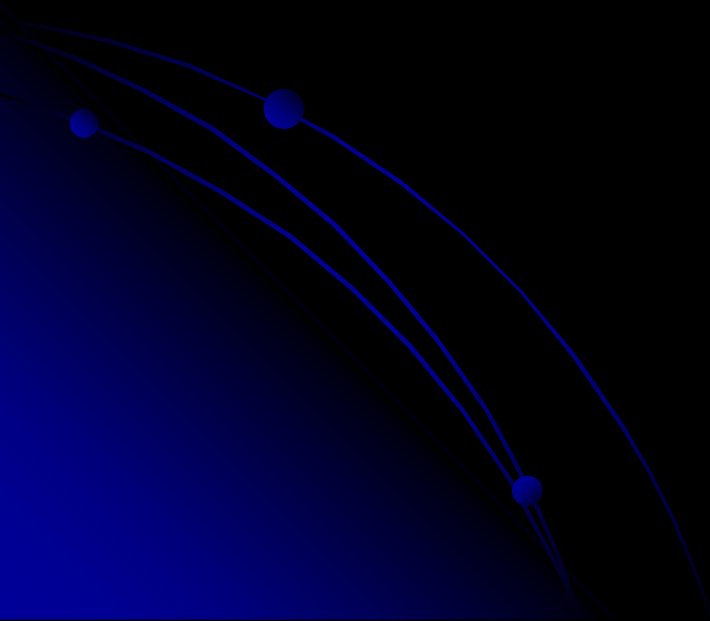
# Зависимость периода полураспада (лет) от кинетической энергии $\alpha$ - частицы (МэВ)





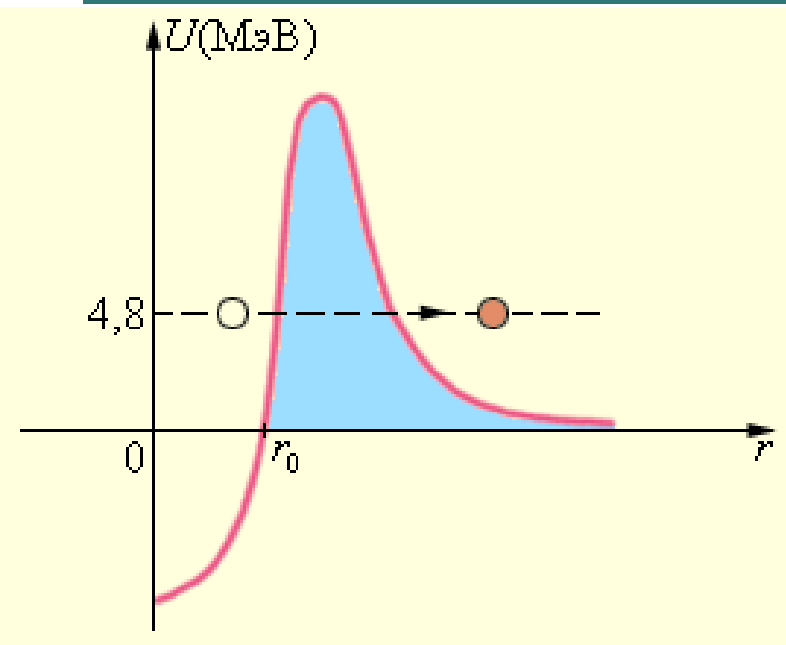
# Тема 1. Атомное ядро. Радиоактивность

- 1.4. Радиоактивность
- 1.5. Закон радиоактивного распада





# Туннелирование $\alpha$ -частицы сквозь потенциальный барьер



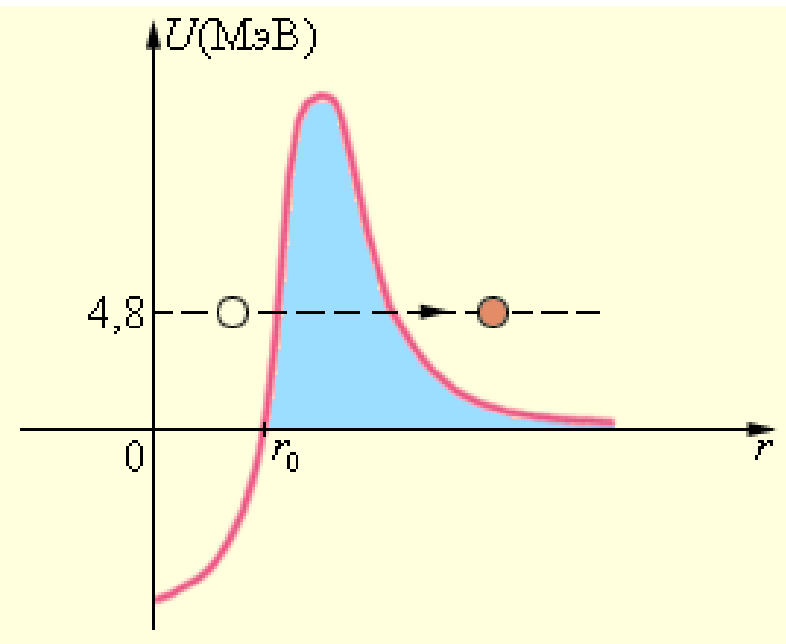
$W$  – вероятность распада

ядра за 1 с:

$dW$  – вероятность распада

ядра за  $dt$ :

# Закон радиоактивного распада



$dN$  – число распадов среди  
 $N$  ядер за время  $dt$ :

# Закон радиоактивного распада

$$N = Ce^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\tau$  – средняя продолжительность жизни ядра

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

$\frac{1}{\tau} = \lambda$      $\lambda$  – постоянная распада

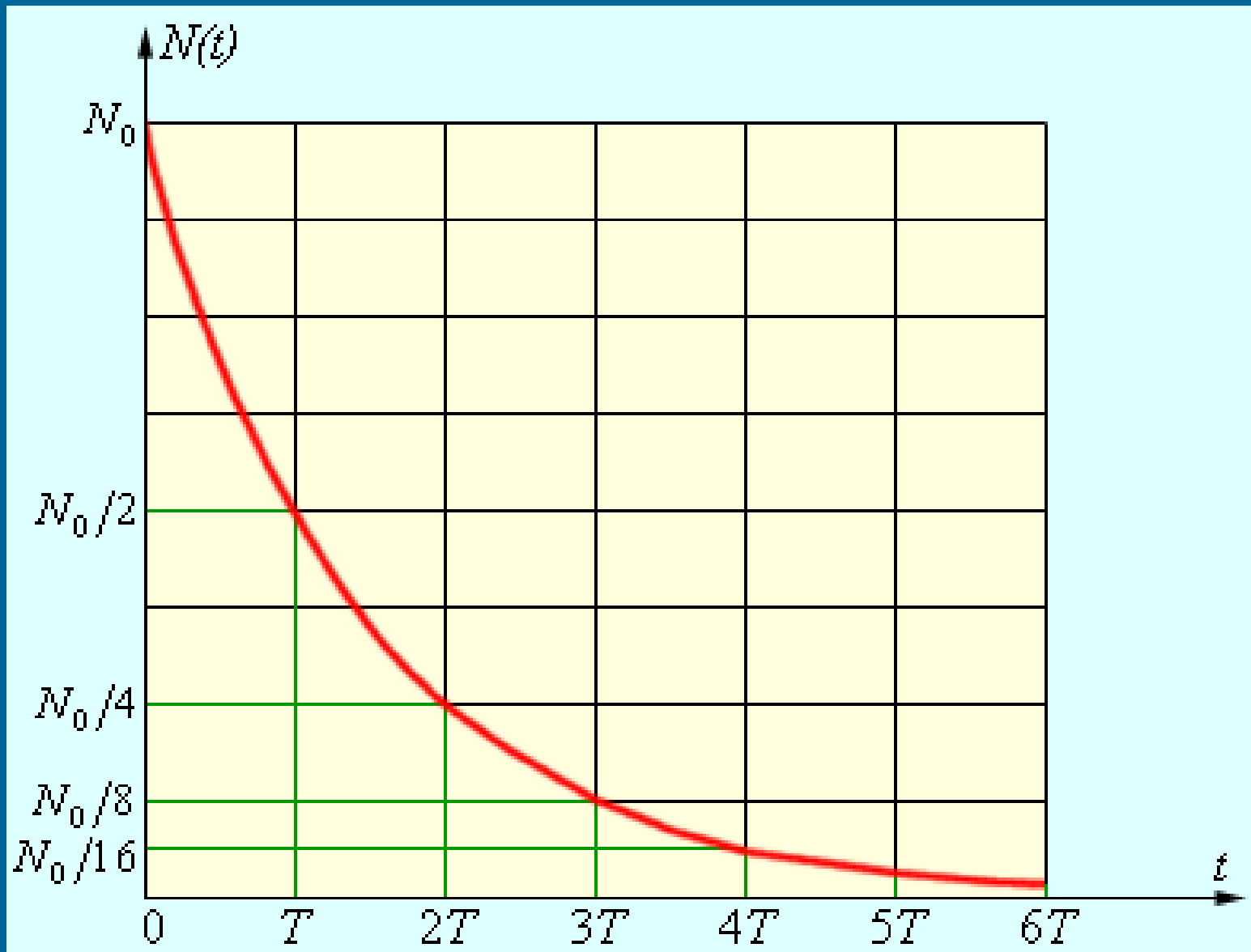
$T$  – период полураспада:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T};$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

# Закон радиоактивного распада



# Активность р/а препарата

*A* – число распадов за 1 с

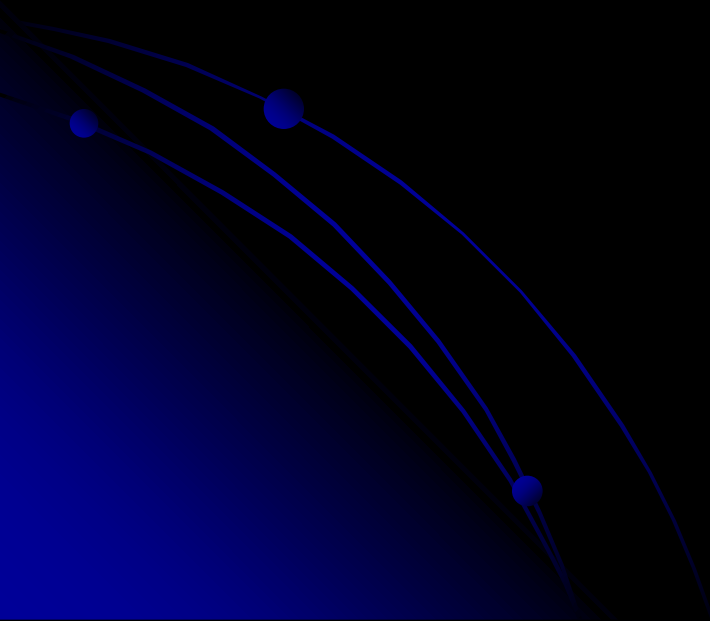
$$A = NW = \frac{N}{\tau} = \lambda N$$

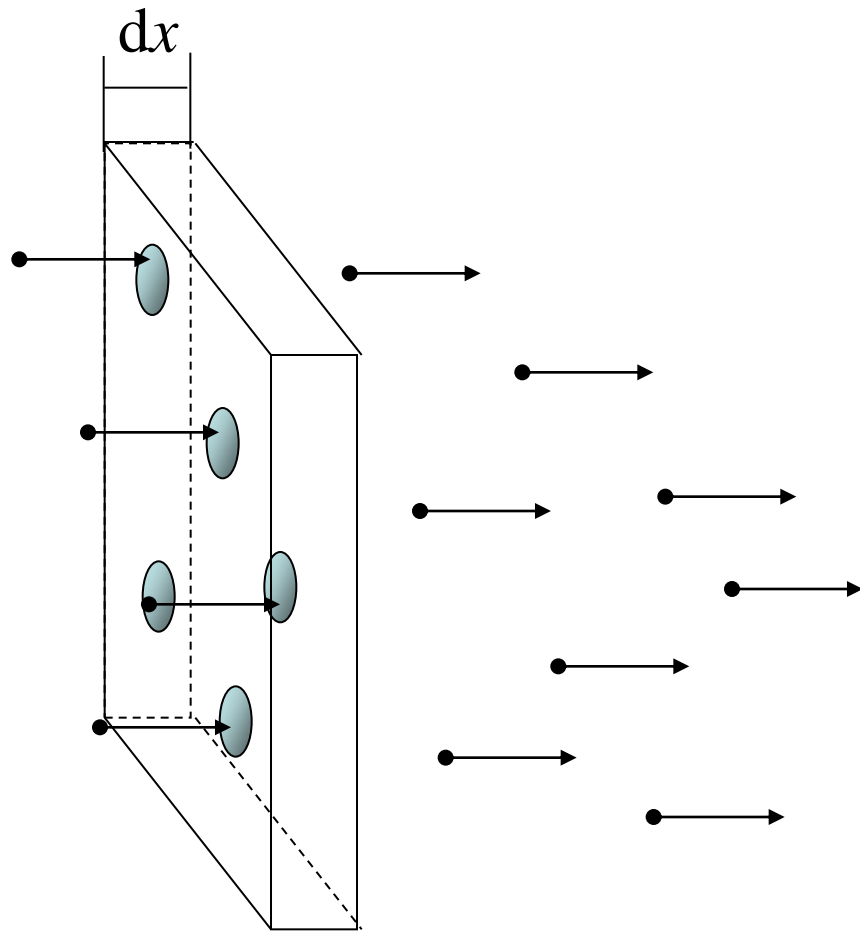
Единица активности (СИ) – беккерель (Бк): 1 распад в секунду

Внесистемная единица – кюри (Ки):  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду

# Тема 1. Атомное ядро. Радиоактивность

- 1.5. Закон радиоактивного распада
- 1.6. Поглощение радиоактивного излучения





$$j = j_0 e^{-n\sigma x} = j_0 e^{-\mu x}$$