

Радиоактивность – это испускание атомными ядрами излучения вследствие перехода ядер из одного энергетического состояния в другое или превращения одного ядра в другое.

Атомные ядра испускают:

- 1) электромагнитные волны высокой энергии (гамма-лучи);
- 2) электроны и позитроны (бета-частицы), вместе с ними испускаются антинейтрино и нейтрино;
- 3) ядра атомов гелия (альфа-частицы), протоны, нейтроны и ядра некоторых лёгких элементов.
- 4) некоторые тяжёлые ядра спонтанно делятся на почти одинаковые осколки;

1896г. – открытие радиоактивности А.Беккерелем.

1906 – 1911 годы - опыты Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц.

1913г. – постулаты Бора.

1920г. – протон.

1932г. – открытие нейтрона Джеймсом Чедвиком.

1934г. - позитронный бета-распад И. и Ф. Жолио-Кюри.

1940г. - спонтанное деление ядер, Г.Н. Флеров и К.А. Петржак.

1984г. - кластерная радиоактивность

Единицы субатомной физики

Энергия $1 \text{ МэВ} = 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$

Масса $1 \text{ МэВ}/c^2$

Длина $1 \text{ Фм} = 1 \text{ Fm} = 10^{-13} \text{ см.}$

Константы

Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек.}$

Приведенная постоянная Планка $\hbar = h/2\pi = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ МэВ} \cdot \text{сек.}$

Масса электрона $m_e = 0.511 \text{ МэВ}/c^2.$

Масса протона $m_p = 938.26 \text{ МэВ} / c^2$

Масса нейтрона $m_n = 939.55 \text{ МэВ} / c^2$

$m_p \approx m_n \approx 1.7 \cdot 10^{-24} \text{ Г}$

Радиус нуклона $\approx 0.8 \text{ Фм}$

Радиус ядра $R \approx r_0 A^{1/3}$, где $r_0 \approx 1.4 \text{ Фм}$

Плотность ядра $\rho \approx 100\,000 \text{ тонн/мм}^3$.

Момент количества движения

$\mathbf{L} = [\mathbf{r} \times \mathbf{p}]$, или $\mathbf{L} = m[\mathbf{r} \times \mathbf{v}]$, где m - масса частицы, \mathbf{v} - скорость.

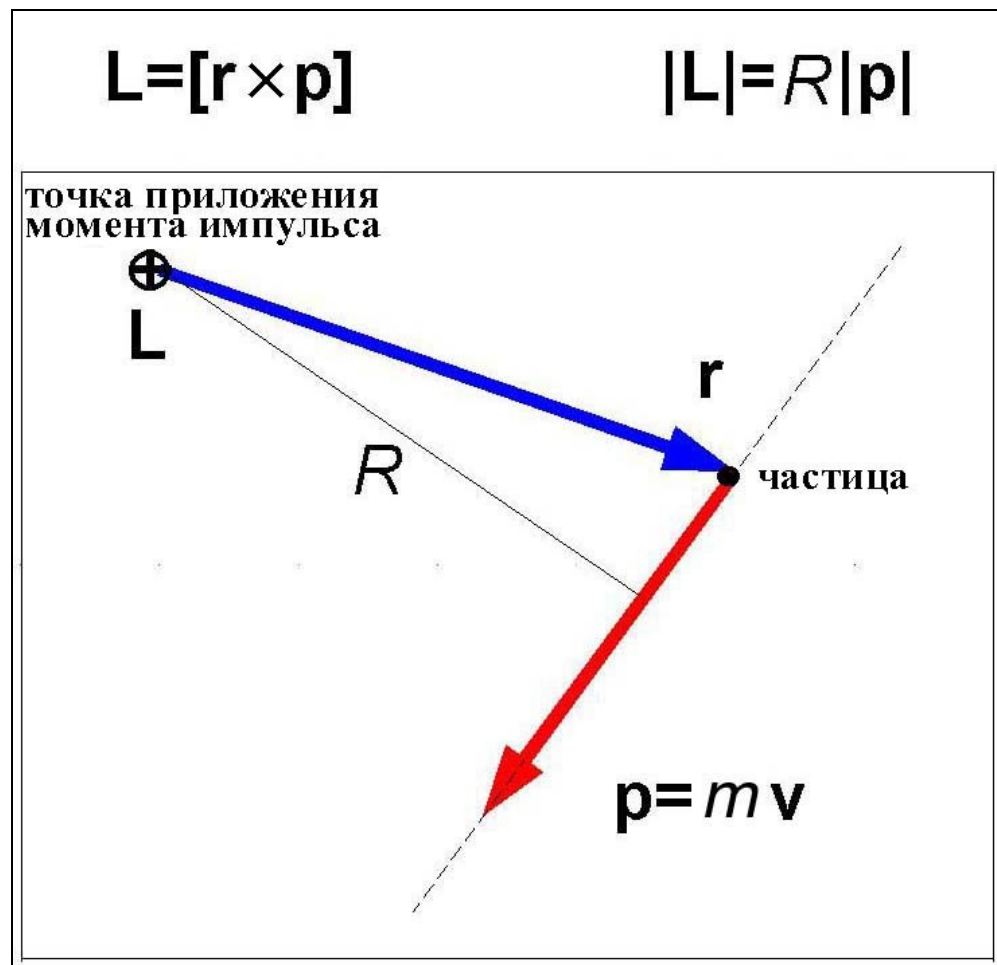


Рис.1 Орбитальный момент количества движения. Вектор момента количества движения \mathbf{L} направлен перпендикулярно плоскости рисунка от нас. R - расстояние от точки приложения момента импульса до траектории частицы.

Фермионы: спин равен $1/2 \hbar$, $3/2 \hbar$,

Бозоны: спин равен $0 \hbar$, $1 \hbar$, $2 \hbar$,

\hbar – приведённая постоянная Планка

Спин электрона $s_e = 1/2 \hbar$

Спин протона $s_p = 1/2 \hbar$

Спин нейтрона $s_n = 1/2 \hbar$

Спин гамма-кванта $s_\gamma = 1 \hbar$

Свойства кварков, из которых состоят нуклоны.

кварки	Спин(\hbar), чётность	Электрический заряд
u	$1/2^+$	$+2/3e$
d	$1/2^+$	$-1/3e$

Протон $p \rightarrow (uud)$, нейтрон $n \rightarrow (udd)$

Энергия связи ядра

$$W_{\text{св}}(A,Z) = (Zm_p c^2 + Nm_n c^2) - M(A,Z)c^2,$$

где $m_p = 938.26 \text{ МэВ} / c^2$ - масса протона,

$m_n = 939.55 \text{ МэВ} / c^2$ - масса нейтрона,

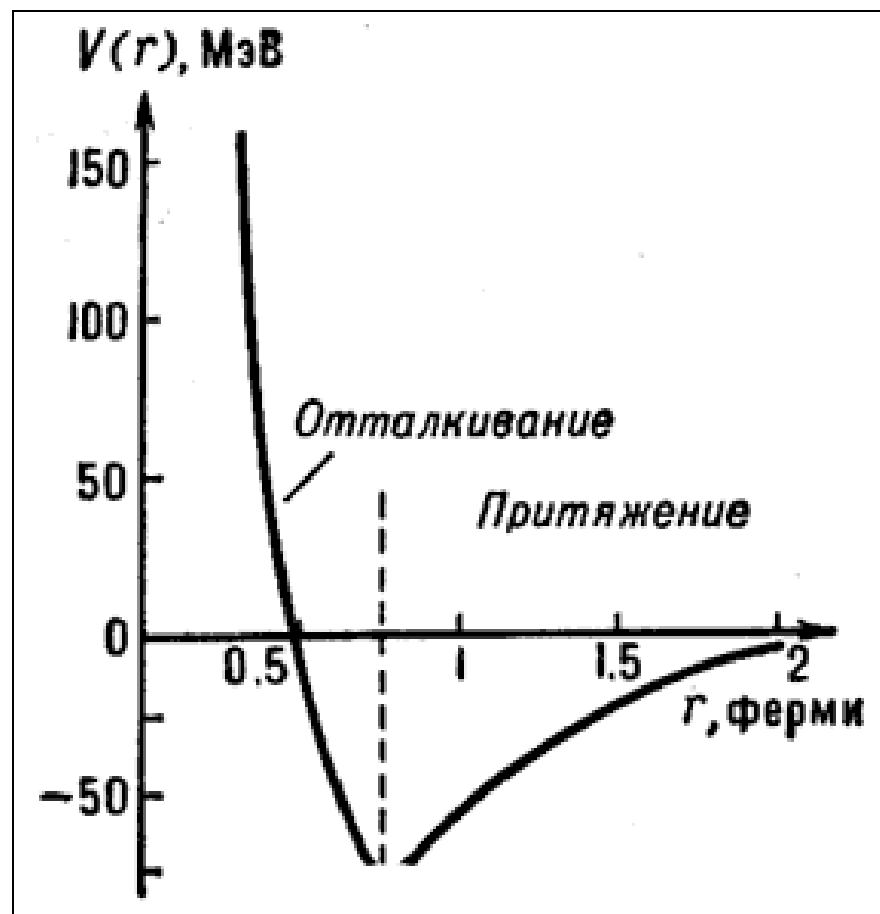
c – скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$,

A – массовое число, $A = N + Z$,

N – число нейтронов,

Z – число протонов.

Потенциал ядерного взаимодействия двух нуклонов.



Формула Вайцзеккера

$$W_{\text{св}}(A,Z) = a_1A - a_2A^{2/3} - a_3Z(Z-1)/A^{1/3} - a_4(A/2 - Z)^2/A + a_5A^{-3/4}$$

$a_1 = 15,75$ МэВ – объёмная энергия;

$a_2 = 17,8$ МэВ – поверхностная энергия;

$a_3 = 0,71$ МэВ – кулоновская энергия;

$a_4 = 94,8$ МэВ – энергия симметрии;

a_5 – энергия парного взаимодействия;

$a_5 = 34$ МэВ для чётно-чётных ядер;

0 для нечётных ядер;

- 34 МэВ для нечётно-нечётных ядер;

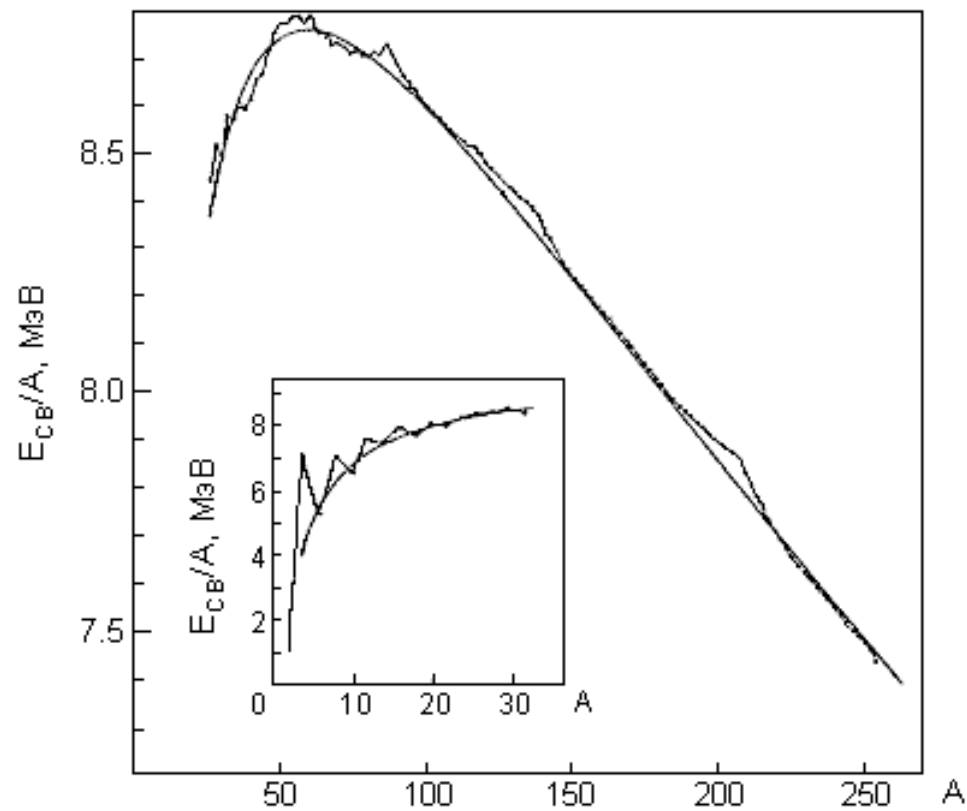
Действие сил спаривания.

Z	N	A	Число стабильных ядер
чётное	чётное	чётное	167
нечётное	чётное	нечётное	53
чётное	нечётное	нечётное	57
нечётное	нечётное	чётное	8
			Всего 285

Стабильные нечётно-нечётные ядра: ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$.

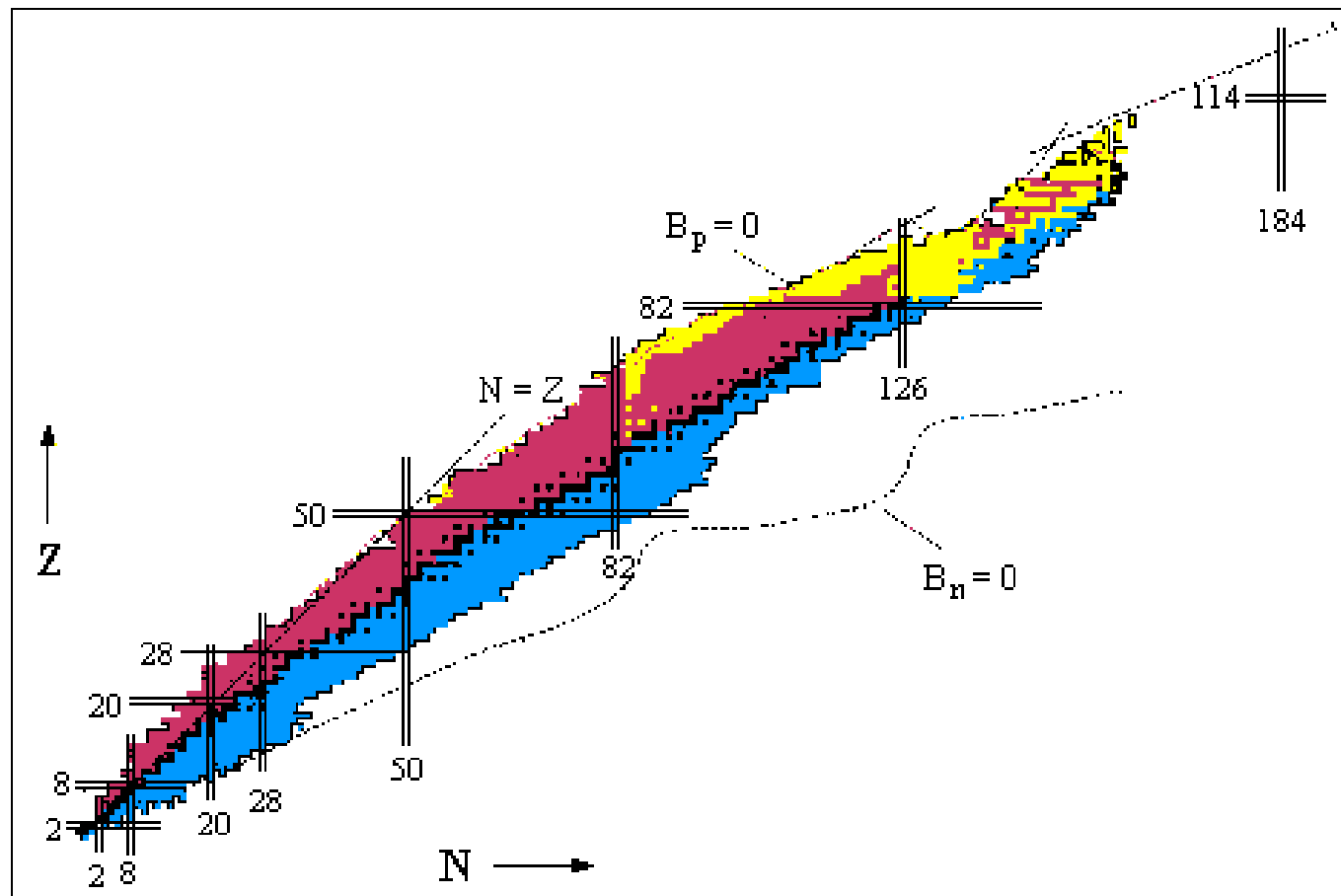
Долгоживущие нечётно-нечётные ядра: калий ${}^{40}\text{K}$, ванадий ${}^{50}\text{V}$, лантан ${}^{138}\text{La}$ и лютеций ${}^{176}\text{Lu}$.

Удельная энергия связи.



Экспериментальные значения удельной энергии связи и расчет по формуле Вайцзеккера.

N-Z диаграмма атомных ядер



$$N/Z = 0.98 + 0.015 \cdot A^{2/3}$$

Общие законы радиоактивного распада.

$$dN = -\lambda N(t) dt$$

где dN - число ядер, распавшихся за время dt ,
 λ – вероятность распада в единицу времени.

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

λ – иначе называется постоянной распада.

$\tau = 1/\lambda$ время жизни радиоактивного ядра.

Период полураспада равен:

$$T_{1/2} = \tau \ln 2$$

Альфа-распад атомных ядер.

Условие альфа-распада:

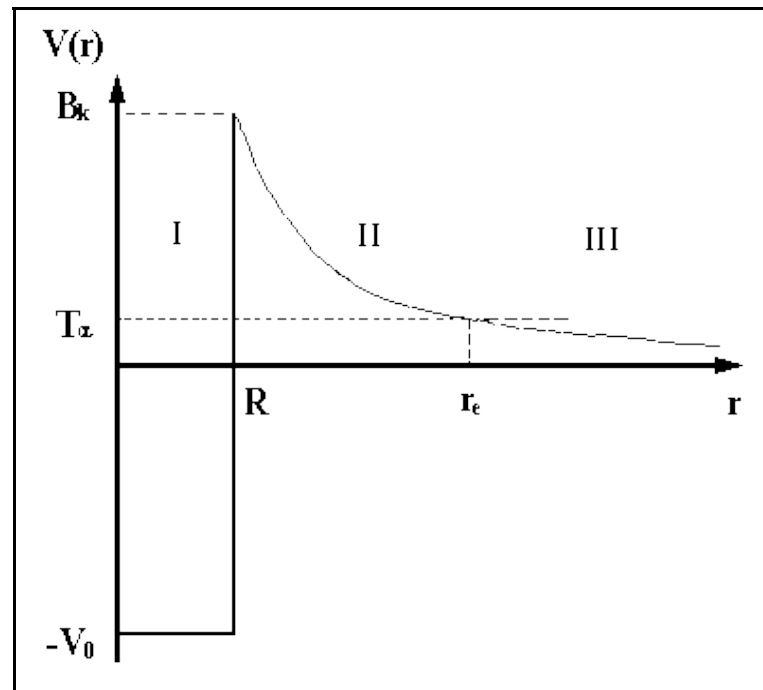
$$M(A,Z) > M(A-4,Z-2) + M(4,2),$$

где $M(4,2) = m_\alpha$ – масса альфа-частицы.

Энергия альфа-распада:

$$Q_\alpha = [M(A,Z) - M(A-4,Z-2) - m_\alpha] \cdot c^2$$

Потенциальная яма для альфа-частиц в ядре



R – радиус ядра.

$$V_K = 2(Z-2)e^2/R \approx 2(Z-2) e^2/(r_0 A^{1/3}) \approx 2(Z-2)/A^{1/3} \text{ МэВ}$$

(Для урана V_K около 35 МэВ)

Формула Гейгера-Неттола

$$\ln T_{1/2} = C (T_{\alpha})^{-1/2} - D,$$

где T_{α} – энергия вылетевшей альфа-частицы

$T_{1/2}$ – период полураспада,

величины C и D не зависят от T_{α} и зависят от Z .

Если $T_{1/2}$ измеряется в секундах, T_{α} измеряется в МэВ, то $C \approx 155$ и $D \approx 55$.

При изменении энергии альфа-частицы от 2 до 9 МэВ период полураспада падает с 10^{24} до 10^{-5} секунды (10^{24} сек $\approx 3 \cdot 10^{16}$ лет).

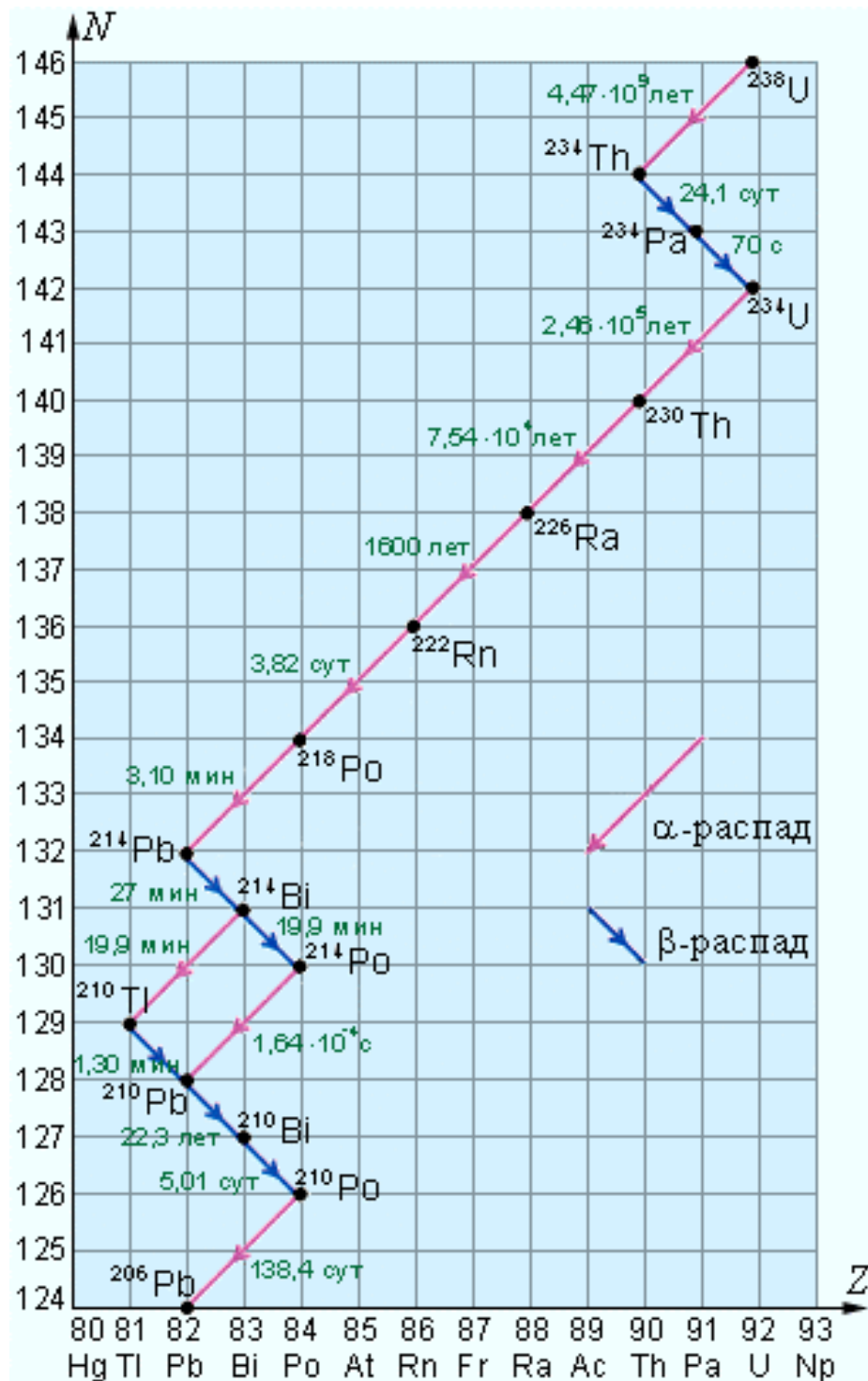


Схема распада радиоактивной серии ^{238}U . Указаны периоды полураспада.

Бета-распад.

Массовые соотношения при бета-распаде:

$$1) \beta^- (n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}) \quad M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e,$$

$$2) \beta^+ (p \rightarrow n + e^+ + \nu) \quad M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e,$$

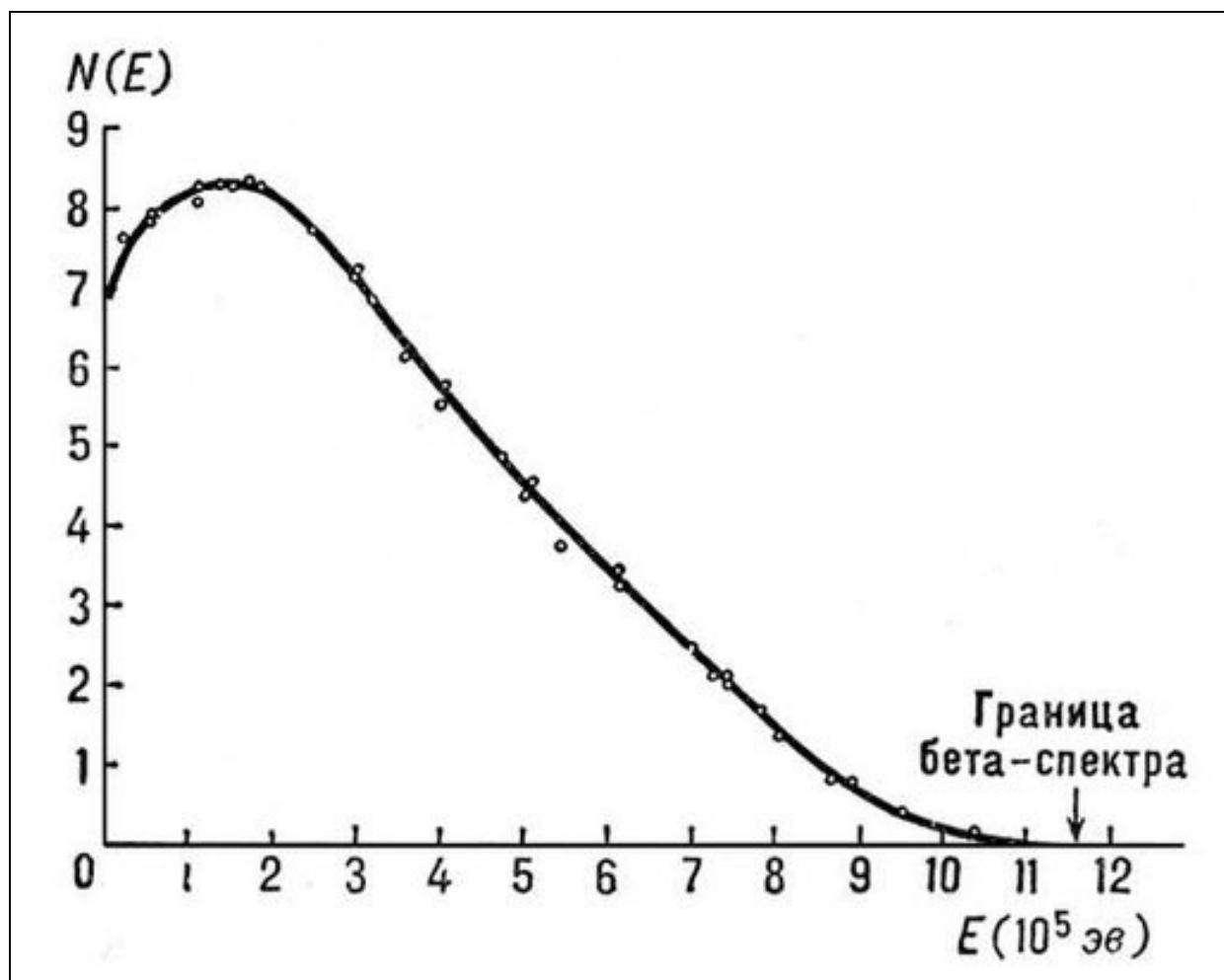
$$3) \text{e-захват } (p + e^- \rightarrow n + \nu) \quad M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1),$$

Энергия бета-распада:

$$Q_{\beta^\pm} = [M(A, Z) - M(A, Z \pm 1) - m_e] \cdot c^2$$

$$Q_e = [M(A, Z) - M(A, Z-1) + m_e] \cdot c^2$$

Спектр электронов при бета-распаде.



Промежуточные бозоны

Масса W^\pm 80 ГэВ/ c^2

Заряд W^\pm $\pm 1e$

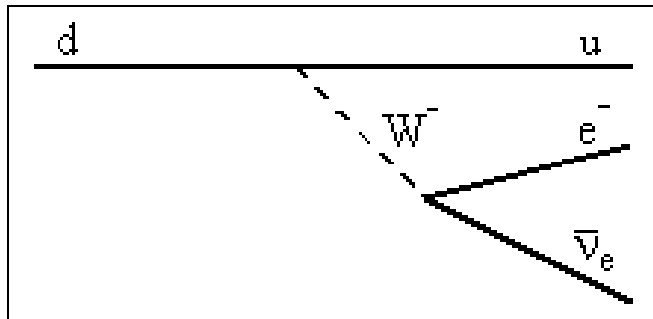
Масса Z 91 ГэВ/ c^2

Заряд Z 0

Спин W^\pm и Z $1\hbar$

Радиус действия слабых сил $r = (\hbar c)/(mc^2) \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{Фм}$

Диаграмма распада d-кварка



Сначала $d \rightarrow u + W^-$ затем $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$

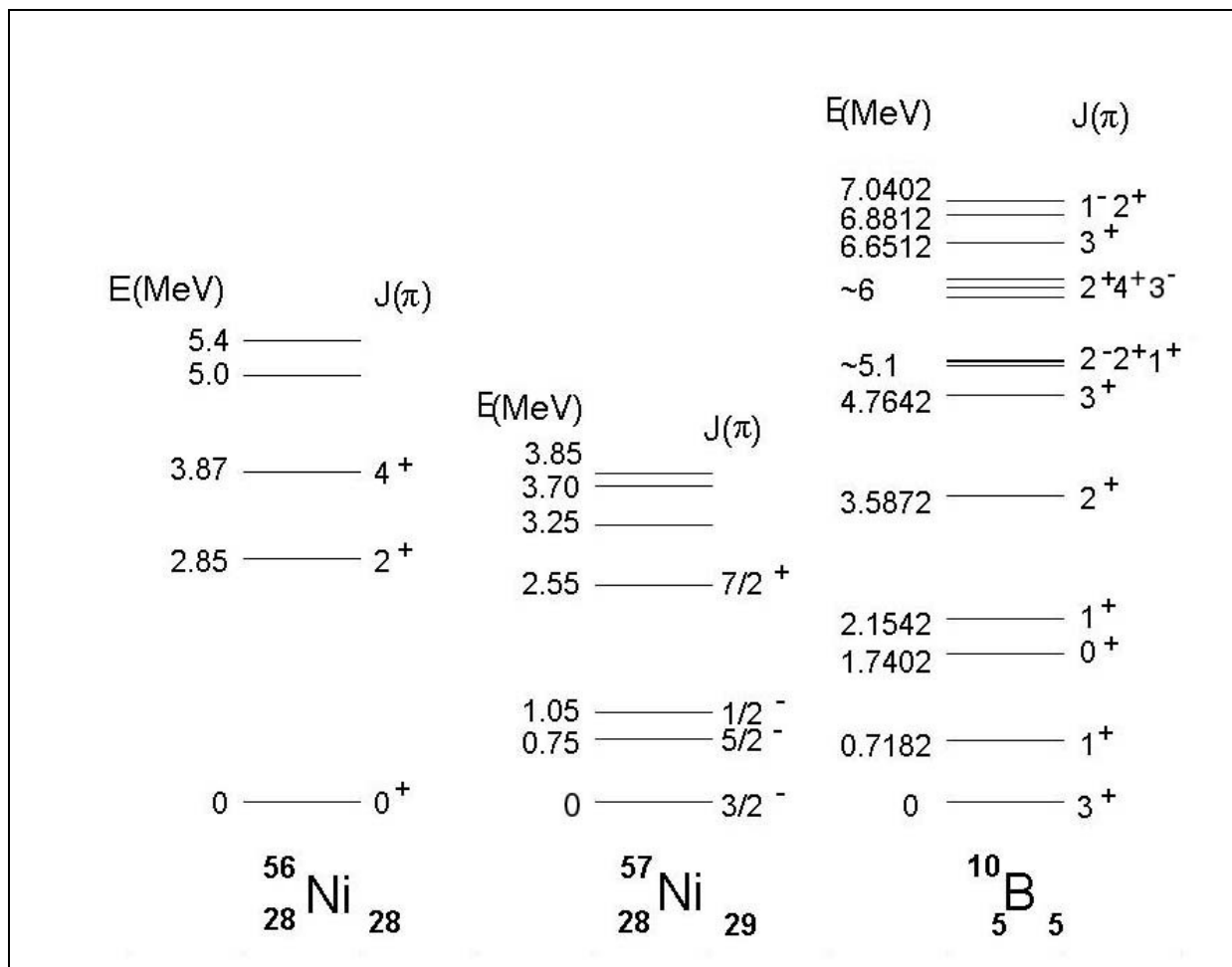
Нейтрон $n \rightarrow (udd)$

Протон $p \rightarrow (uud)$,

Распад нейтрона: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

Гамма-распад.

Схема уровней некоторых изотопов.



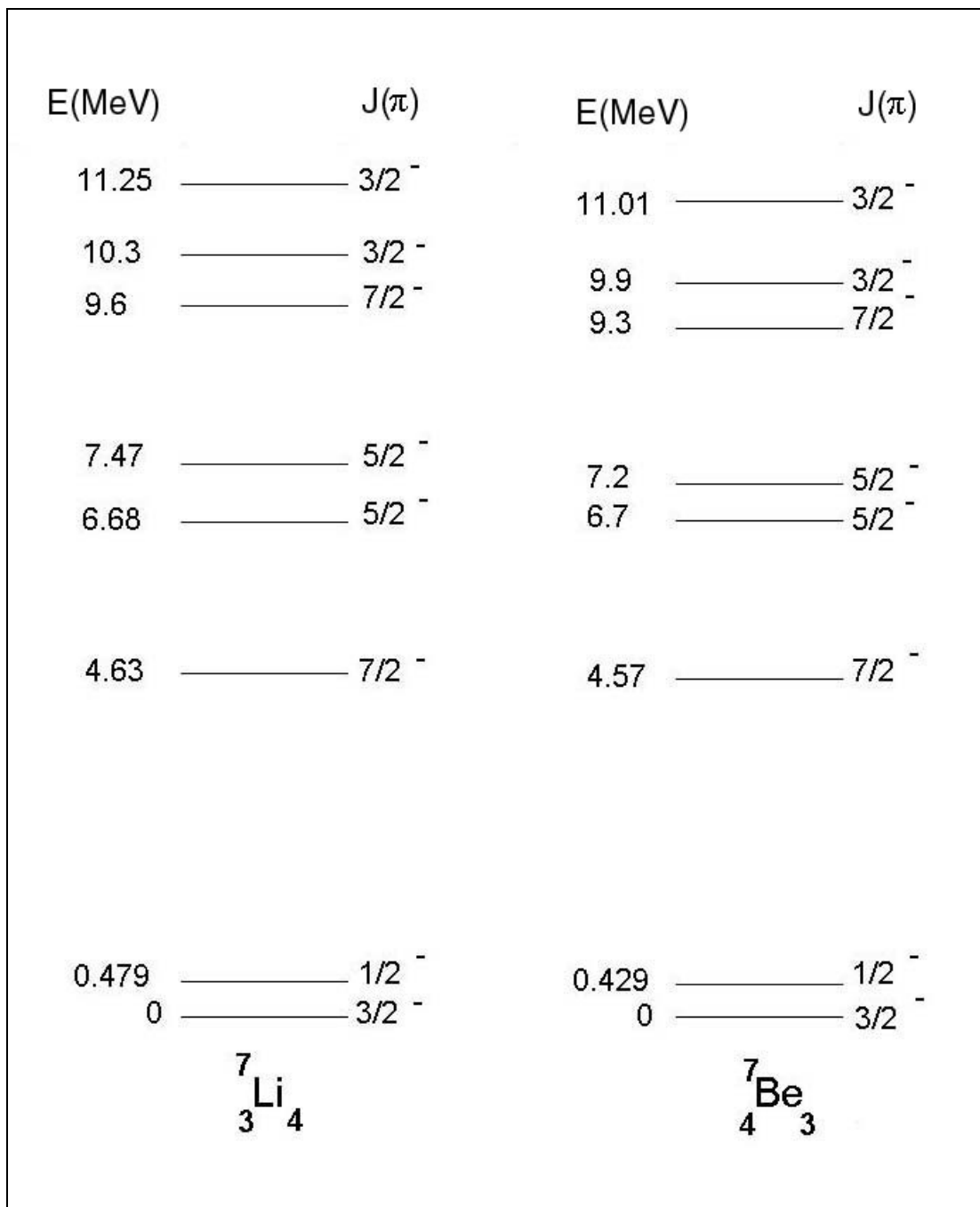


Схема уровней ${}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}$. Литий и бериллий состоят из одного и того же количества нуклонов. Отличие только в числе протонов. Видно, что кулоновское взаимодействие слабо влияет на энергетические уровни лёгких ядер.

Из возбуждённого состояния в основное ядро, как правило, переходит излучая гамма-кванты, или передаёт свою энергию электронной оболочке атома. Вследствие чего, испускается электрон. Такие электроны называют электронами внутренней конверсии.

Если энергия возбуждения велика, то могут испускаться нейтроны или протоны. Ядро может также разделиться на несколько осколков.

Вероятность гамма-излучения тем выше, чем выше энергия перехода и меньше уносимый гамма-квантом момент импульса.

Импульс гамма-кванта $p = h\nu/c = E/c$

Спин гамма-кванта $s_\gamma = 1\hbar$

Чётность $\pi = -1$

Взаимодействие с веществом:

1. Фотоэффект на электронах атомных оболочек.
2. Комptonовское рассеяние на свободных электронах.
3. Образование электрон-позитронных пар.

Фотоэффект и образование пар происходят в присутствии третьего тела: атома или ядра, так как импульс, который несёт гамма-квант, не может весь передаться электрону или электрон-позитронной паре. Для того чтобы понять это достаточно воспользоваться выражением для энергии и импульса релятивистской частицы:

$$E = (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$$

Где E – полная энергия частицы.