



«Радиологические измерения»

Лекция 2. Основы ядерной физики.

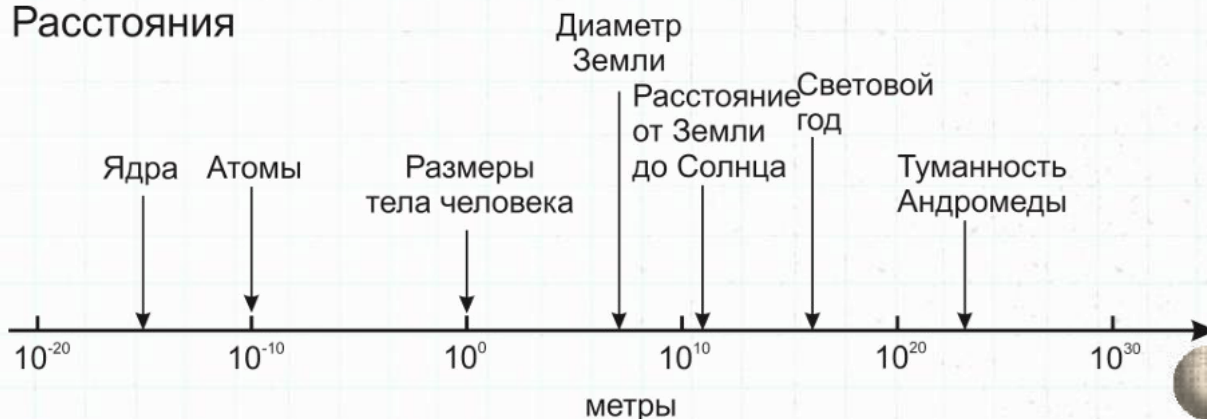
*и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.*

Масштабы и единицы измерения в ядерной физики

Радиус атома имеет величину порядка 10^{-8} см.

Радиус ядра имеет величину порядка $10^{-12} \div 10^{-13}$ см.

Расстояния



Плотности



В качестве единицы энергии широко используется электронвольт (эВ).

1 эВ представляет собой энергию, приобретаемую электроном, ускоренным разностью потенциалов в 1 вольт.

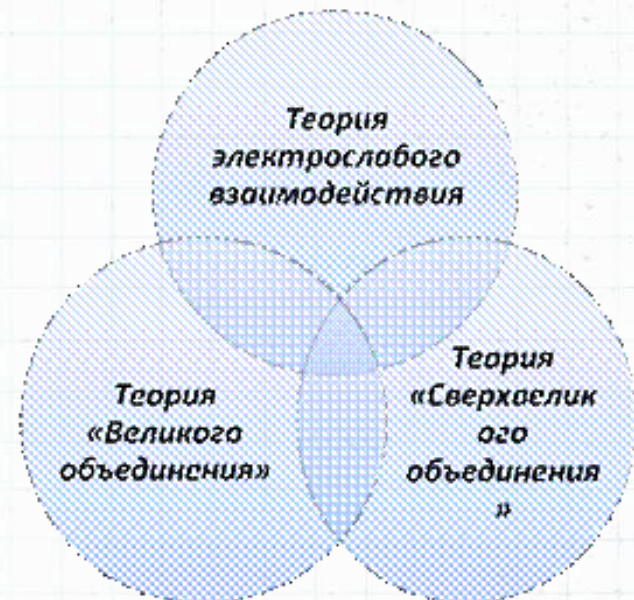
Энергия связи протонов и нейтронов в ядре равна в среднем $8 \cdot 10^6$ эВ.

Стандартная модель

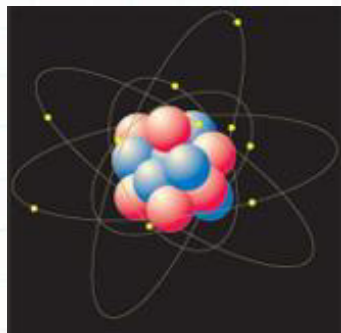
масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
спин→	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Фундаментальные взаимодействия

Вид	Взаимодействующие частицы	Проявление	Механизм	Интенсивность	Радиус действия, м
СИЛЬНОЕ 	тяжелые частицы (кварки, нуклоны)	ядерные силы, обеспечивающие существование ядер	обмен глюонами	1	10^{-15}
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ 	заряженные частицы, фотоны	кулоновская сила, обеспечивающая существование атома	обмен фотонами	$\frac{1}{137}$	∞
СЛАБОЕ 	кварки, лептоны	β - распад	обмен бозонами	10^{-10}	10^{-18}
ГРАВИТАЦИОННОЕ 	все тела Вселенной	всемирное тяготение, обеспечивающее существование звезд, планетных систем	обмен гравитонами ?	10^{-38}	∞

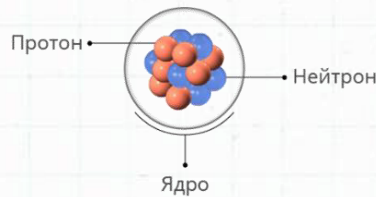


АТОМ [греч. атом - неделимый] - это структура материи, представляющая собой микрочастицу, состоящую из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов, связанных между собой электромагнитным взаимодействием.



НУКЛИД ${}_N^A Y_Z$ – это атом химического элемента Y , состоящий из ядра с определенным числом протонов Z и определенным числом нейтронов N и числа электронов, равного числу протонов, которые связываются с ядром посредством электромагнитных сил.

Масса нуклида M_Y равна массе ядра $M(Z, N)$ плюс массе Z электронов Zm_e минус массовый эквивалент энергии связи $B_e(Z)$ всех электронов в оболочках атома $M_Y = M(Z, N) + Zm_e - B_e(Z)$.



Протон-нейтронная модель ядра

ЯДРО АТОМА ${}_N^AX_Z$ — это структура материи, представляющая собой микрочастицу, состоящую из нуклонов с различными зарядовыми состояниями (N нейтронов и Z протонов), связанных ядерными силами, то есть сильными взаимодействиями.

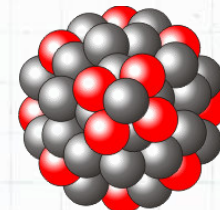
Основными характеристиками стабильного ядра являются:

Массовое число -
Электрический заряд -
Масса -
Энергия связи -
Радиус -
Спин -
Магнитный момент -
Квадрольный электрический момент -
Изотопический спин -
Четность волновой функции -
Спектр возбужденных состояний -

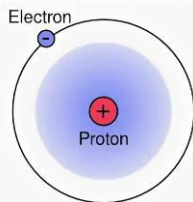
A
 Z
 M
 ΔE
 R
 I
 μ
 G
 T
 P
 E_i

Радиоактивные ядра дополнительно характеризуются:

Типом радиоактивного превращения;
Периодом полураспада - $T_{1/2}$
Энергетическим спектром испускаемых частиц.



НУКЛОН [лат. nucleus - ядро] – общее наименование для нейтронов и протонов - частиц, из которых построены все ядра атомов. Предполагается, что нуклон имеет два зарядовых состояния, одно из которых с положительным единичным электрическим зарядом называется **протон**, а второе электрически нейтральное называется **нейтрон**.



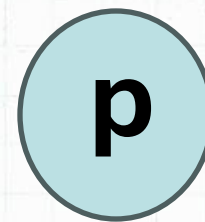
Протон

Заряд, равен заряду электрона - $e = \begin{cases} 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} \\ 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \end{cases}$

Масса - $m_p = 1836,1 m_e = \begin{cases} 1,6726 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 1,007276 \text{ а.е.м.} \\ 938,28 \text{ МэВ} \end{cases}$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

Магнитный момент - $\mu_p = +2.79 \mu_y$



НУКЛОН [лат. nucleus - ядро] – общее наименование для нейтронов и протонов - частиц, из которых построены все ядра атомов. Предполагается, что нуклон имеет два зарядовых состояния, одно из которых с положительным единичным электрическим зарядом называется **протон**, а второе электрически нейтральное называется **нейтрон**.

Нейтрон

n

Заряд, равен нулю

Масса - $m_n = 1838,6m_e = 1,008665 \text{ a.e.m.}$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

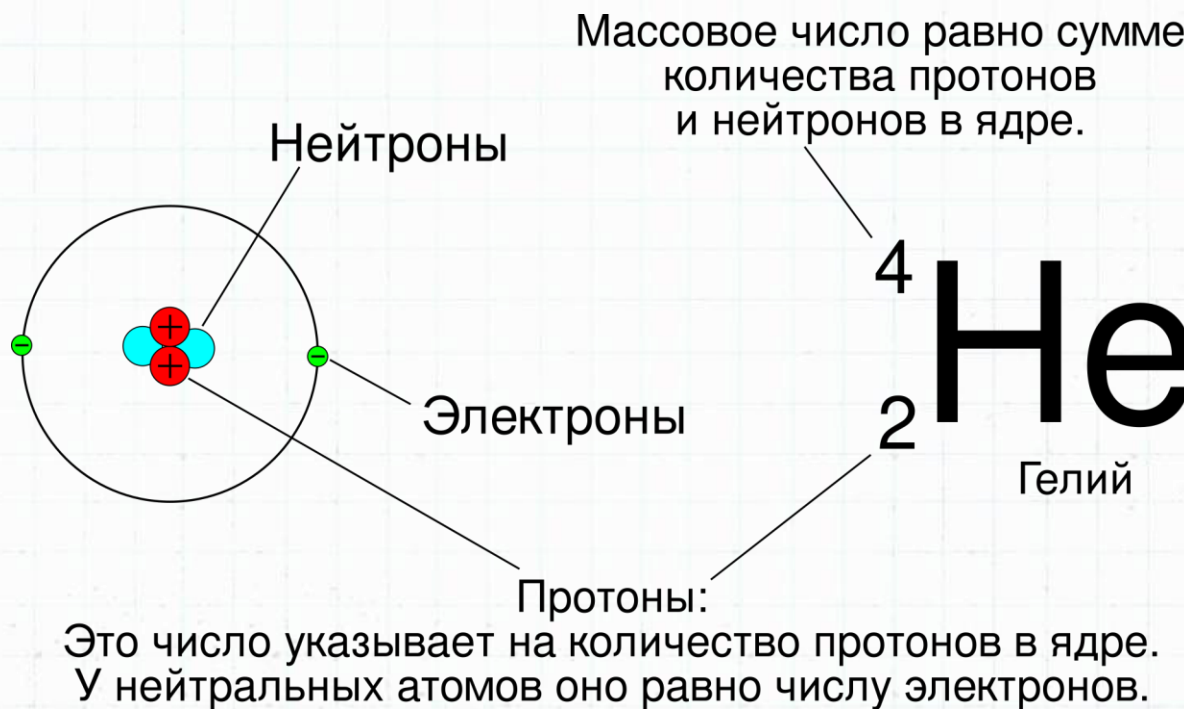
Магнитный момент - $\mu_n = -1,91\mu_y$ *Заряд равен нулю!*

В свободном состоянии нейтрон является нестабильным и испытывает самопроизвольное превращение в протон с испусканием электрона и антинейтрино.

ЗАРЯДОВОЕ ЧИСЛО ЯДРА Z
(ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР ЯДРА) – это количество протонов в ядре, то есть атомный номер химического элемента в периодической таблице Менделеева.

МАССОВОЕ ЧИСЛО ЯДРА A – это полное число нуклонов (Z протонов плюс N нейтронов) в ядре:

$$A = Z + N$$



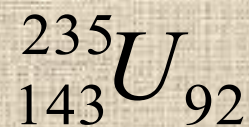
Структура атомного ядра



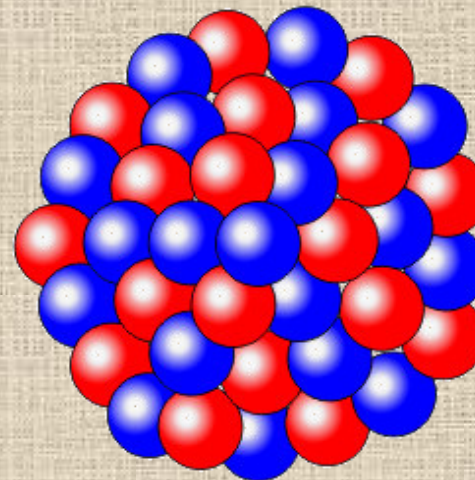
ядро водорода
(протон)



ядро гелия
(альфа-частица)



ядро урана



$$A=Z+N$$

нуклоны $\left\{ \begin{array}{l} \text{●} - \text{протон (Z)} \\ \text{●} - \text{нейтрон (N)} \end{array} \right.$

$$T_{1/2} \approx 12 \text{ мин} \quad n \rightarrow p + \beta^- + \tilde{\nu}_e$$

АТОМНАЯ ЕДИНИЦА МАССЫ аем – это 1/12 часть массы ядра углерода ^{12}C .

$$1 \text{ аем} = M_{^{12}\text{C}}/12 = (1,660531 \pm 0,000011) \cdot 10^{-24} \text{ г}$$

$$1 \text{ аем} = 931,48 \text{ МэВ}$$

$$M_p = 1,00759 \text{ а.е.м.} = 938,2 \text{ МэВ} = 1836 \cdot m_e$$

$$M_n = 1,00898 \text{ а.е.м.} = 939,5 \text{ МэВ} = 1838,5 \cdot m_e$$

МАССА ЯДРА $M(^A_Z\text{X})$ – это масса нуклида минус масса всех атомных электронов и плюс их суммарная энергия связи с ядром.

$$M(^A_Z\text{X}) = M(^A_Z\text{Y}) - Zm_e + B_e(Z).$$

ИЗОТОПЫ – ядра,
имеющие одно и то же Z ,
при разных N и A .

ИЗОТОНЫ – ядра,
имеющие одно и то же N ,
при разных Z и A .

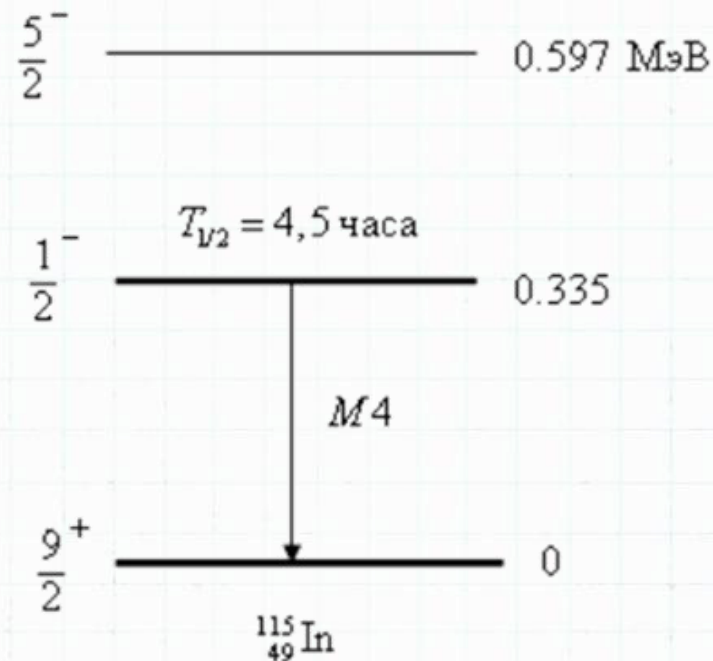
Изотопы (Ca, $Z=20$)

20	39Ca 859.6 MS ϵ : 100.00%	40Ca >3.0E+21 Y 96.94% 2 ϵ	41Ca 1.02E+5 Y ϵ : 100.00%	42Ca STABLE 0.647%	43Ca STABLE 0.135%	44Ca STABLE 2.09%	45Ca 162.61 D β +: 100.00%	46Ca >0.28E+16 Y 0.004% 2 β -	47Ca 4.536 D β +: 100.00%
	38K 7.636 M ϵ : 100.00%	39K STABLE 93.2581%	40K 1.248E+9 Y 0.0117% β +: 89.28% ϵ : 10.72%	41K STABLE 6.7302%	42K 12.321 H β +: 100.00%	43K 22.3 H β +: 100.00%	44K 22.13 M β +: 100.00%	45K 17.81 M β +: 100.00%	46K 105 S β +: 100.00%
18	37Ar 34.95 D ϵ : 100.00%	38Ar STABLE 0.0632%	39Ar 2.69 Y β +: 100.00%	40Ar STABLE 99.6003%	41Ar 109.61 M β +: 100.00%	42Ar 32.9 Y β +: 100.00%	43Ar 5.37 M β +: 100.00%	44Ar 11.87 M β +: 100.00%	45Ar 21.48 S β +: 100.00%
	36Cl 3.01E+5 Y β +: 98.10% ϵ : 1.90%	37Cl STABLE 24.23%	38Cl 37.24 M β +: 100.00%	39Cl 56.2 M β +: 100.00%	40Cl 1.35 M β +: 100.00%	41Cl 38.4 S β +: 100.00%	42Cl 6.8 S β +: 100.00%	43Cl 3.13 S β +: 100.00%	44Cl 0.56 S β +: 100.00% β -n < 8.00%
16	35S 87.51 D β +: 100.00%	36S STABLE 0.02%	37S 5.05 M β +: 100.00%	38S 170.3 M β +: 100.00%	39S 11.5 S β +: 100.00%	40S 8.8 S β +: 100.00%	41S 1.99 S β +: 100.00% β -n	42S 1.013 S β +: 100.00%	43S 0.28 S β +: 100.00% β -n: 40.00%
	19	21	23	25	27				

Изотоны ($N=20$) **Изобары ($A=40$)**

ИЗОБАРЫ – ядра, имеющие одно и то же A , при разных Z и N .

ИЗОМЕРЫ – возбужденные ядра с одинаковыми количествами протонов и нейтронов по сравнению с ядром в основном состоянии, но имеющие большое время жизни в возбужденном метастабильном энергетическом состоянии.



ИЗБЫТОК МАССЫ ЯДРА Δ - это разность между массой ядра в атомных единицах массы M и его массовым числом A

Массы нуклидов измерены с большой точностью методами масс-спектрометрии и ядерных реакций.

Массы частиц в углеродной шкале масс (а.е.м.):

Нейтрон	1,008665
Протон	1,007276
Электрон	0,00054858
Нуклид H^1	1,007825
Нуклид C^{12}	12,000000

$$6m_n + 6M(H^1) = 6 \cdot 1,008665 + 6 \cdot 1,007825 = 12,098940$$

Разница суммы масс частиц находящихся в свободном и связанном состояниях называется **дефектом массы - Δm** .

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА – это энергия, необходимая для полного расщепления ядра на отдельные, составляющие его, протоны и нейтроны, то есть энергия, равная работе по удалению их на бесконечность друг от друга

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

$$\Delta m = [Zm(H^1) + (A - Z)m_n - M_{\text{ам}}(A, Z)]$$

Величина равная разности $M_{\text{ам}}(A, Z) - A$

называется **избытком массы** - $\Delta = M_{\text{ам}}(A, Z) - A$

Если использовать избыток массы, то можно записать

$$\Delta m = [Z\Delta H^1 + (A - Z)\Delta_n - \Delta_{\text{ам}}(A, Z)]$$

Энергия эквивалентная **дефекту массы**, называется **энергией связи**.

$$\Delta E = [Z\Delta H^1 + (A - Z)\Delta_n - \Delta_{\text{ам}}(A, Z)] \cdot c^2.$$

Полуэмпирическая формула для энергии связи

$$\varepsilon(A) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} - a_5 \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$a_1 = 15,75 \text{ МэВ}$ – коэффициент объемной энергии связи;

$a_2 = 17,8 \text{ МэВ}$ – коэффициент поверхностной энергии связи;

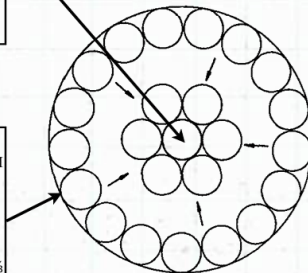
$a_3 = 0,711 \text{ МэВ}$ – коэффициент кулоновской энергии связи;

$a_4 = 23,7 \text{ МэВ}$ – коэффициент симметрической энергии связи;

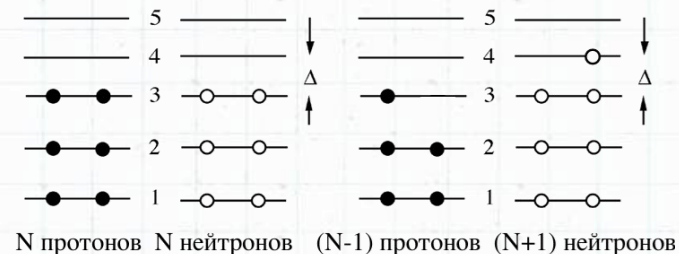
$a_5 = +34 \text{ МэВ}; 0; -34 \text{ МэВ}$ – коэффициент спаривательной энергии связи

Для случая бесконечной ядерной материи энергия связи одного нуклона определяется его взаимодействием с ближайшими соседями. В этом случае энергия связи нуклонов пропорциональна их числу $\sim A$

Нуклоны, расположенные на поверхности ядра, имеют меньшее число связей, чем внутренние, поэтому полная энергия связи уменьшается на величину, пропорциональную поверхности ядра $\sim A^{2/3}$



Нуклоны в ядре подчиняются принципу Паули, так что изменение числа протонов или нейтронов при одинаковом значении массового числа A приводит к уменьшению энергии связи $\sim (Z - A/2)^2/A$

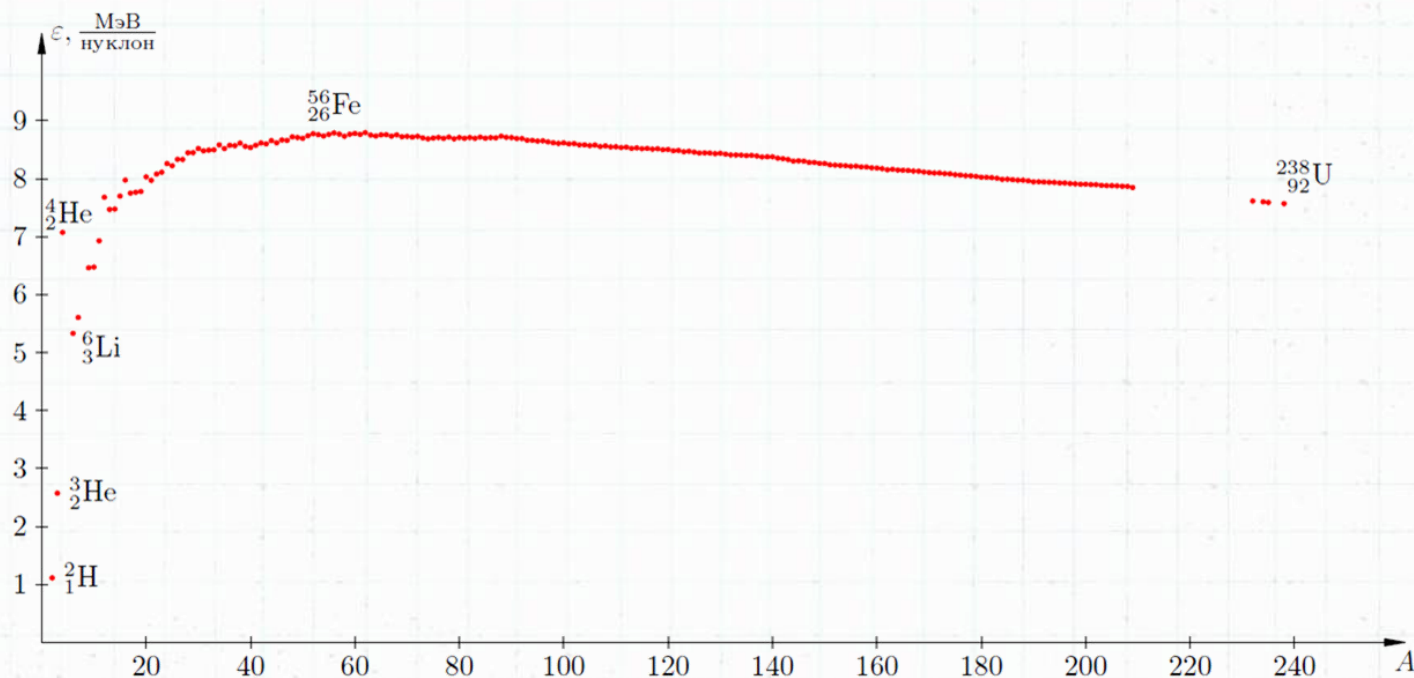


Кулоновская энергия сферы радиуса R с зарядом Z пропорциональна Z^2/R , поэтому энергия связи ядра уменьшается на величину $\sim Z^2/A^{1/3}$



УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ε – это величина, равная средней энергии связи данного ядра, приходящейся на один нуклон

$$\varepsilon = \Delta W / A \text{ [МэВ/нуклон]}$$



ЧЕТНО-ЧЕТНЫЕ ЯДРА – это ядра, состоящие из четного числа протонов $Z = 0, 2, 4, \dots$ и четного числа нейтронов $N = 0, 2, 4, \dots$.

НЕЧЕТНО-НЕЧЕТНЫЕ ЯДРА – это ядра, состоящие из нечетного числа протонов $Z = 1, 3, 5, \dots$ и нечетного числа нейтронов $N = 1, 3, 5, \dots$.

Для ядер с $Z = N$ удельная энергия выше, чем для других ядер с тем же значением A .

Четно-четные (по Z и N) ядра имеют в среднем большие значения, чем нечетно-четные, а нечетно-нечетные – меньшие.

НЕЧЕТНО-ЧЕТНЫЕ ЯДРА – это ядра, состоящие из нечетного числа протонов $Z = 1, 3, 5, \dots$ и четного числа нейтронов $N = 0, 2, 4, \dots$.

ЧЕТНО-НЕЧЕТНЫЕ ЯДРА – это ядра, состоящие из четного числа протонов $Z = 0, 2, 4, \dots$ и нечетного числа нейтронов $N = 1, 3, 5, \dots$.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

