

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Московской области
«Университет природы, общества и человека «Дубна»
(Университет «Дубна»)
Факультет естественных и инженерных наук
Кафедра Ядерной физики

Специальный семинар по физике ядра и ядерным реакциям

Мажен С.

Т.

Основные свойства атомных ядер. Масса и энергия связи ядра

Вопрос

4.

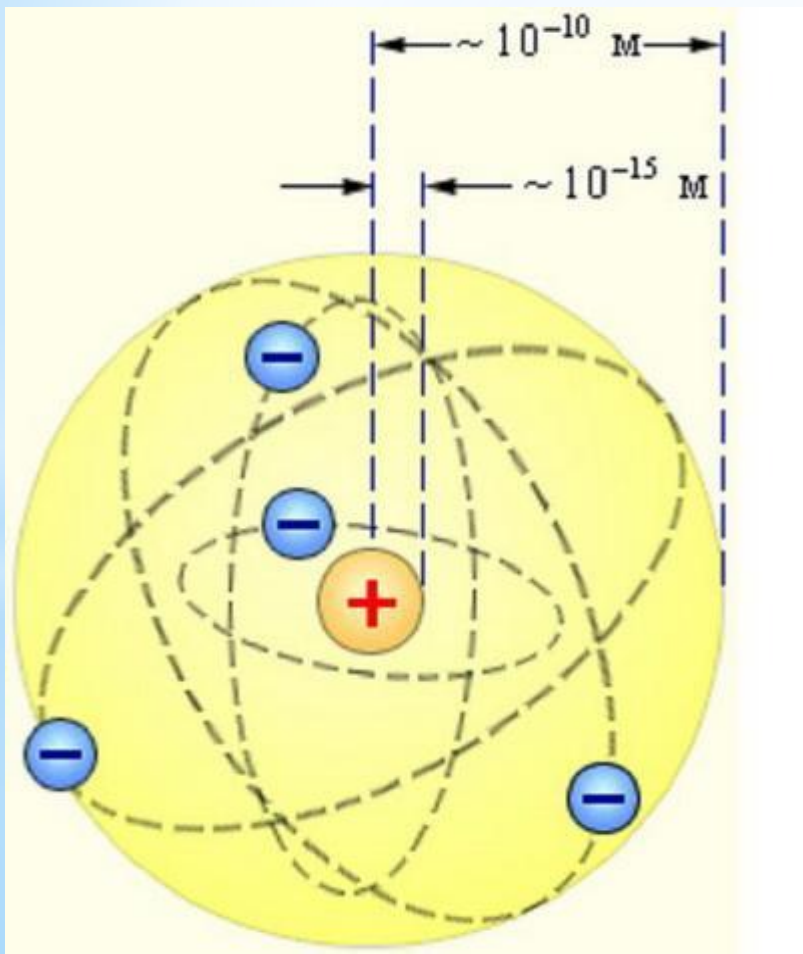
2017

* Вопросы

1. Строение ядра;
2. Магические ядра;
3. Ядерные силы;
4. Энергия связи ядра;
5. Полуэмпирическая формула Вайцзеккера;

* Атомное ядро

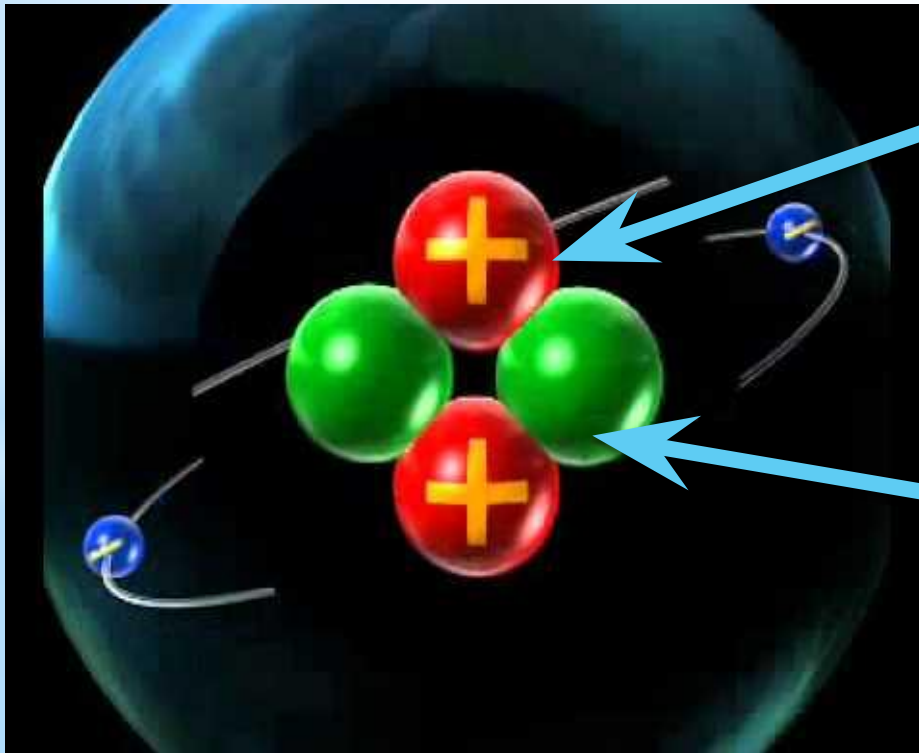
Атомное ядро – это центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся его масса и весь положительный электрический заряд.



- Большинство ядер имеют форму, близкую к сферической;
- Размеры ядра $\approx 10^{-14} - 10^{-15}$ м (размеры атома $\approx 10^{-10}$ м)
- Плотность вещества в ядре ≈ 230 млн. тонн/см³.

Атомное ядро - система связанных и взаимодействующих друг с другом нуклонов:

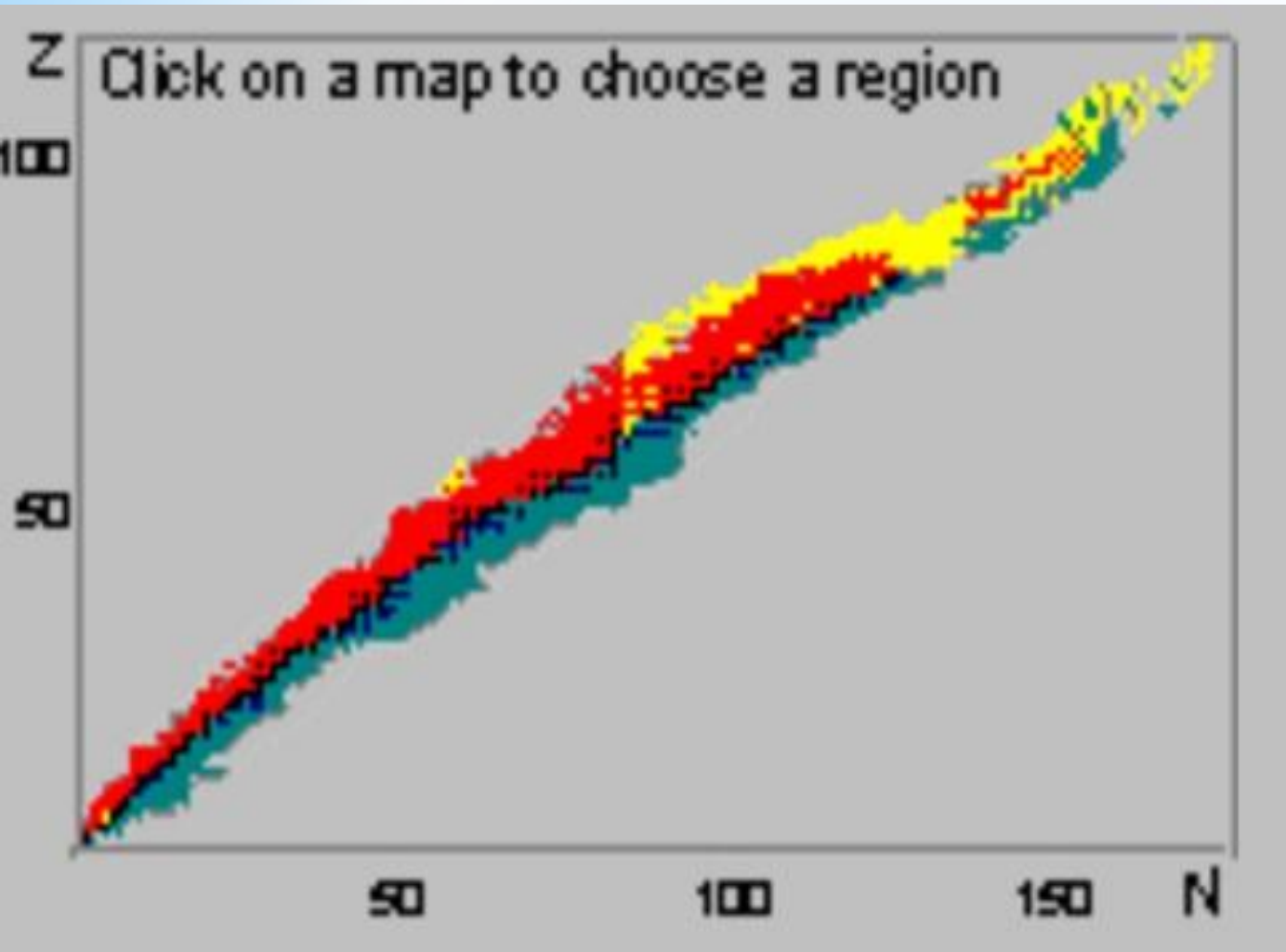
протонов p и нейтронов n .



Протон-положительно заряженная частица и равен по модулю заряду электрона: $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а масса $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг, четность +1, спин $\frac{1}{2}$.

Нейтрон-это нейтральная частица, масса которой равна $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг не имеет заряда, четность +1, спин $\frac{1}{2}$.

*Карта ядер



stable

α -decay

β^- - decay

β^+ - decay

Spontaneous fission

Isomeric transition

p-decay

n-decay

t-decay

p-decay

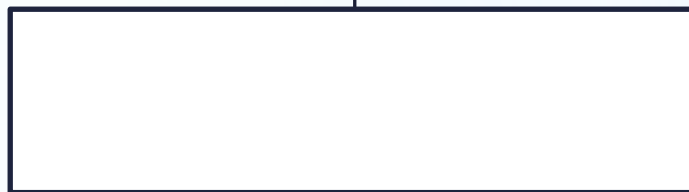
2n-decay

Unknown

* Ядерные силы

Силы, которые не дают протонам разлететься под действием кулоновских, носят название *ядерных сил*.

Ядерные силы являются проявлением сильного взаимодействия и действуют на расстояниях 10^{-14} - 10^{-15} м (размеры ядра).



Ядерные силы заметно проявляются на расстояниях порядка размеров ядра 10^{-14} - 10^{-15} м. На больших расстояниях кулоновские силы их подавляют. На меньших расстояниях ядерные силы становятся силами отталкивания.

Каждый нуклон в большом ядре связан ядерными силами не со всеми нуклонами, а с некоторыми соседями. Их число не зависит от размеров ядра

Для разрыва этих связей необходимо затратить определенную энергию.

* Энергия связи ядра

Минимальная энергия,
необходимая для разделения
его на отдельные нуклоны
называется *энергией связи
ядра*.

Энергия связи зависит от масс покоя протона и нейтрона, которые в масштабах ядра весьма различимы:

$$m_p = 1.00728 \text{ а. е. м.}$$

$$m_n = 1.00867 \text{ а. е. м.}$$

$$1 \text{ а. е. м.} = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ Г}$$

$$E=mc^2 = 931.5 \text{ МэВ} - \text{энергия эквивалентная } 1 \text{ а. е. м.}$$

Масса ядра, найденная экспериментально и масса ядра, полученная суммированием числа масс протонов и нейтронов не одинаковы, если последние находятся в свободном состоянии. Это различие может быть охарактеризовано величиной

$$\Delta m = \sum m_{\text{нук}} - m_0 = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$$

которая носит название *дефекта масс*. Уменьшение массы при образовании ядра из свободных частиц означает, что при этом уменьшается энергия этой системы частиц на величину энергии связи

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}})c^2 \quad (20 \text{ формула в списке формул})$$

Рис.1. Примеры дефект масс в NRV

		Binding energy (MeV)		
		Experiment [2]	Theory [3]	Sh.corr. [3]
Li^7	Mass Excess	14.9071052 (0.00000423)		
	BE	39.245		
	BE/A	5.606		
Sn^{100}	Mass Excess	-57.282972 (0.301518)	-57.870	
	BE	825.298	825.885	-10.020
	BE/A	8.253	8.259	
U^{238}	Mass Excess	47.309112 (0.001881)	47.770	
	BE	1801.689	1801.228	-1.270
	BE/A	7.570	7.568	

- * Удобнее рассматривать энергию связи, приходящуюся на 1 нуклон - **удельную энергию связи**:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

Удельная энергия является средней работой по удалению нуклона из ядра.

У легких элементов ε растет с ростом A . Достигает ≈ 8 МэВ (массовое число в пределах 50-65).

Затем падает до 7.6 МэВ у U^{238} .

Рис.3. График зависимости удельной энергии связи от массового числа

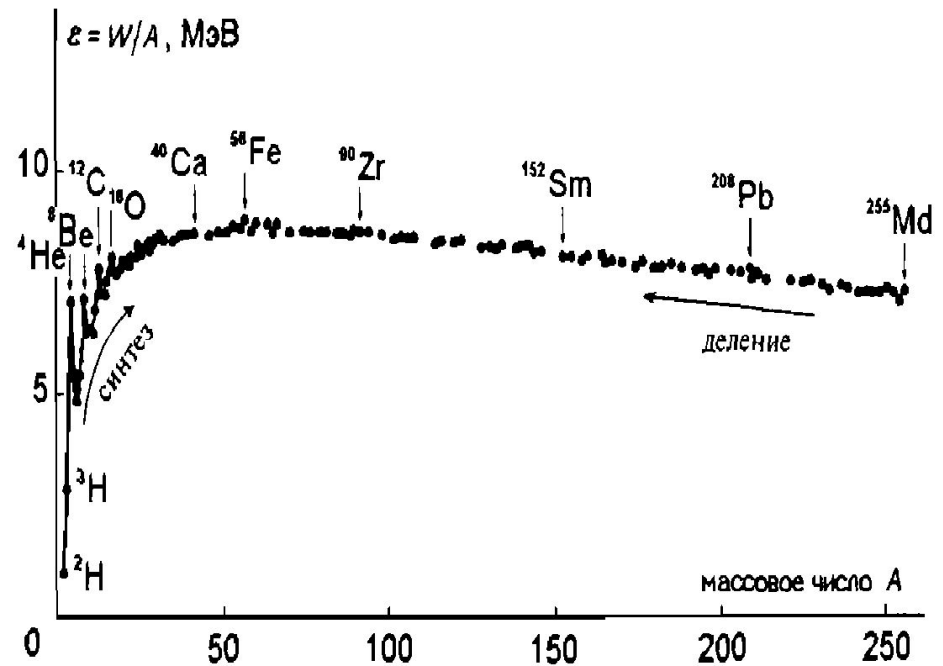


Рис.2. Примеры удельной энергий связи в NRV

Binding energy (MeV)				
		Experiment [2]	Theory [3]	Sh.corr. [3]
Li^7	Mass Excess	14.9071052 (0.00000423)		
	BE	39.245		
	BE/A	5.606		
Sn^{100}	Mass Excess	-57.282972 (0.301518)	-57.870	
	BE	825.298	825.885	-10.020
	BE/A	8.253	8.259	
U^{238}	Mass Excess	47.309112 (0.001881)	47.770	
	BE	1801.689	1801.228	-1.270
	BE/A	7.570	7.568	

*Магические ядра

В особую группу можно выделить атомные ядра, содержащие так называемые *магические* числа протонов или нейтронов.

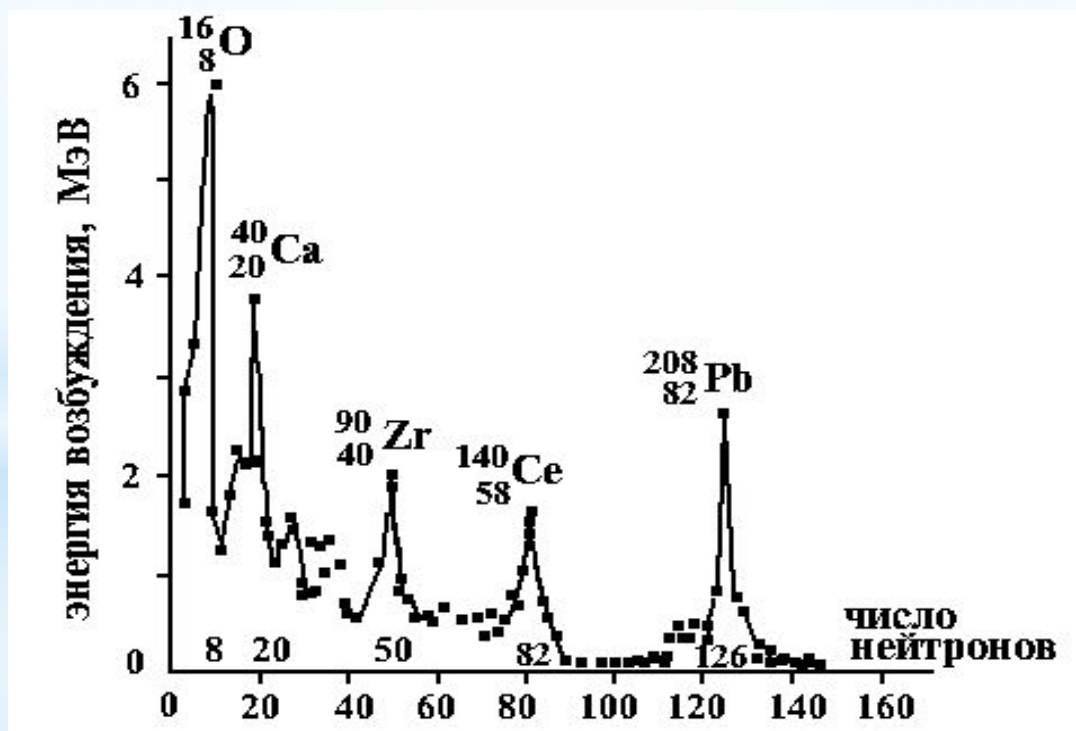
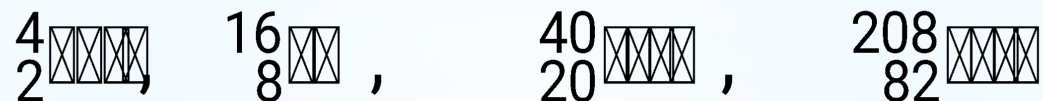
Особенностями таких ядер являются:

- Энергия связи больше, чем у соседних ядер;
- Повышенная распространённость в природе.

Z	2	8	20	28	50	82
N	2	8	20	28	50	82

Существование магических чисел является проявлением оболочечной структуры ядра. Магическим числам нуклонов отвечают ядра с заполненными нуклонными оболочками, имеющими повышенную устойчивость, подобно атомам инертных газов с заполненными электронными оболочками.

Ядра, содержащие магические числа протонов и нейтронов, называются *дважды магическими*. К ним относятся стабильные ядра. Ядро ^{40}Ca - самое тяжелое стабильное ядро с $N = Z$. После ^{40}Ca все известные ядра с $N = Z$ являются протон избыточными и распадаются в результате β^+ - распада и γ -захвата.



* Полумпирическая формула Вайцзеккера

На этой основе был создан способ описания ядра в модели жидкой капли, предложенный в 1935 г.

Вайцзеккером:

$$E_{\text{св}} = aA - bA^{2/3} - c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - d \frac{(A - 2Z)^2}{A} + A^{-3/4} \delta$$

(21 формула в списке формул)

Члены формулы Вайцзеккера

$$1. E_{об} = aA$$

Объемная энергия. Утверждает, что для бесконечной ядерной материи, не имеющей поверхности $E_{св} \sim A$.

НО! ядро имеет поверхность и нуклоны на поверхности связаны слабее, чем внутри. Следовательно, чем больше поверхность, тем меньше $E_{св}$.

Поэтому вводится слагаемое поверхностной энергии $E_{пов}$ пропорциональное поверхности ядра со знаком "-":

Поверхность ядра пропорциональна $R^2 = (r_0 A^{1/3})^2$, $r_0 \approx 1.2 - 1.3$ Фм.
Значит

$$R^2 \sim A^{2/3}.$$

$$2. E_{пов} = bA^{2/3}.$$

Поверхностная энергия. Утверждает, что ядро имеет поверхность.

Ядерная жидкость имеет заряд Z , обусловленный протонами, которые испытывают кулоновское отталкивание, а значит ослабляют удельную энергию связи для тяжелых ядер.

Кулоновская энергия - составная часть $E_{\text{св}}$ со знаком "-".

Для равномерного распределения заряда электрическая энергия равна

$$\frac{3Z^2 e^2}{5R}.$$

Кулоновские силы – дальнедействующие, и поэтому кулоновская энергия пропорциональна числу взаимодействующих пар, то есть

$$3. E_{\text{кул}} = c \frac{Z^2}{A^{1/3}}.$$

Кулоновская энергия

Опыт показал, что ядра, состоящие из одинакового числа нейтронов и протонов ($N=Z$), обладают большей устойчивостью, большей энергией связи, чем с разными.

Отклонение от равенства ($N=Z$) в любую сторону ведет к уменьшению энергии связи. Это должно быть учтено в формуле для энергии.

Член, учитывающий такое уменьшение энергии, получил название энергии симметрии. Он берется в следующем виде:

$$4. E_{\text{сим}} = d \frac{(N-Z)^2}{A} = d \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

Энергия симметрии

и вводится в формулу со знаком минус.

Последнее слагаемое в формуле для энергии связи связано со следующим:

Ядра с четным A можно разделить на две группы:

- a) четно-четные ядра с четным числом нейтронов и протонов;
- b) нечетно-нечетные ядра с нечетным числом, как нейтронов, так и протонов.

Опыт показывает, что четно-четные ядра имеют систематически большую энергию связи, чем нечетные, в то время как ядра нечетно-нечетные имеют меньшую энергию связи. Особенно четко это наблюдается в области легких ядер.

Такая особенность в поведении удельной энергии связи отражается в формуле для энергии связи добавкой члена, имеющего вид

$$\delta \cdot A^{-3/4},$$

$$\text{где } \delta = \begin{cases} +|\delta| & \text{— для четно — четных ядер} \\ 0 & \text{— для нечетных ядер} \\ -|\delta| & \text{— для нечетно — нечетных ядер} \end{cases}$$

В том обстоятельстве, что энергия связи оказывается систематически большей для ядер, содержащих четное число нейтронов и протонов, проявляется эффект парного взаимодействия между частицами одного типа. Этот эффект получил название спаривания одинаковых нуклонов в ядре. При спаривании, как показывают измерения ядерных масс, энергия связи возрастает приблизительно на 1 МэВ. Эта дополнительная энергия:

$$5. E_{\text{сп}} = \delta \cdot A^{-3/4},$$

Энергия спаривания.

$$E_{\text{св}} = aA - bA^{2/3} - c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - d \frac{(A - 2Z)^2}{A} + A^{-3/4} \delta$$

Эта формула получила название полуэмпирической формулы Вайцзеккера. Коэффициенты в формуле подбираются так, чтобы получилось наилучшее согласие с опытом. В настоящее время приняты следующие значения:

$$a = 15.75 \text{ МэВ};$$

$$b = 17,8 \text{ МэВ};$$

$$c = 0,71 \text{ МэВ};$$

$$d = 23,7 \text{ МэВ};$$

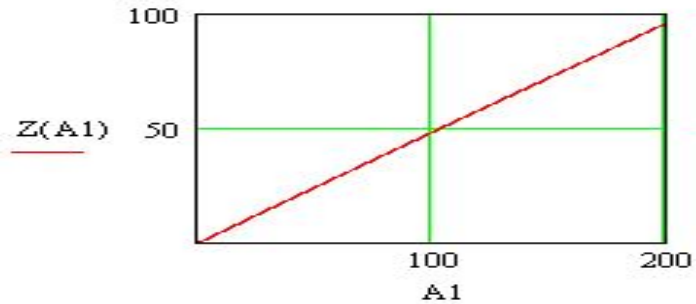
$$\delta = 34 \text{ МэВ}$$

Формула Вайцзеккера для энергии связи в большинстве случаев справедлива с точностью до нескольких МэВ и чрезвычайно полезна при выяснении всех существенных общих свойств ядер. Однако некоторые детали не отражаются этой формулой должным образом. Сюда относятся, например, особая устойчивость “магических” ядер и флуктуации энергии спаривания.

Пример 1 в Mathcad формулы Вайцзеккера

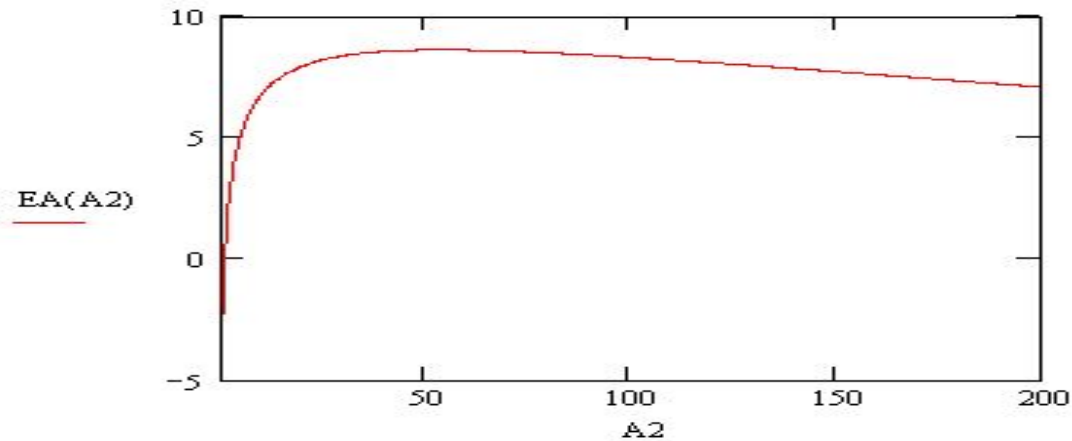
a1 := 15.75 a2 := 17.8 a3 := 0.71 a4 := 23.7

$$Z(A) := \frac{A}{2 + 0.0146 \cdot \sqrt[3]{A}}$$



$$E(A) := a1 \cdot A - a2 \cdot A^{\frac{2}{3}} - a3 \cdot \frac{Z(A)^2}{\sqrt[3]{A}} - a4 \cdot \frac{(A - 2 \cdot Z(A))^2}{A}$$

$$EA(A) := \frac{E(A)}{A}$$

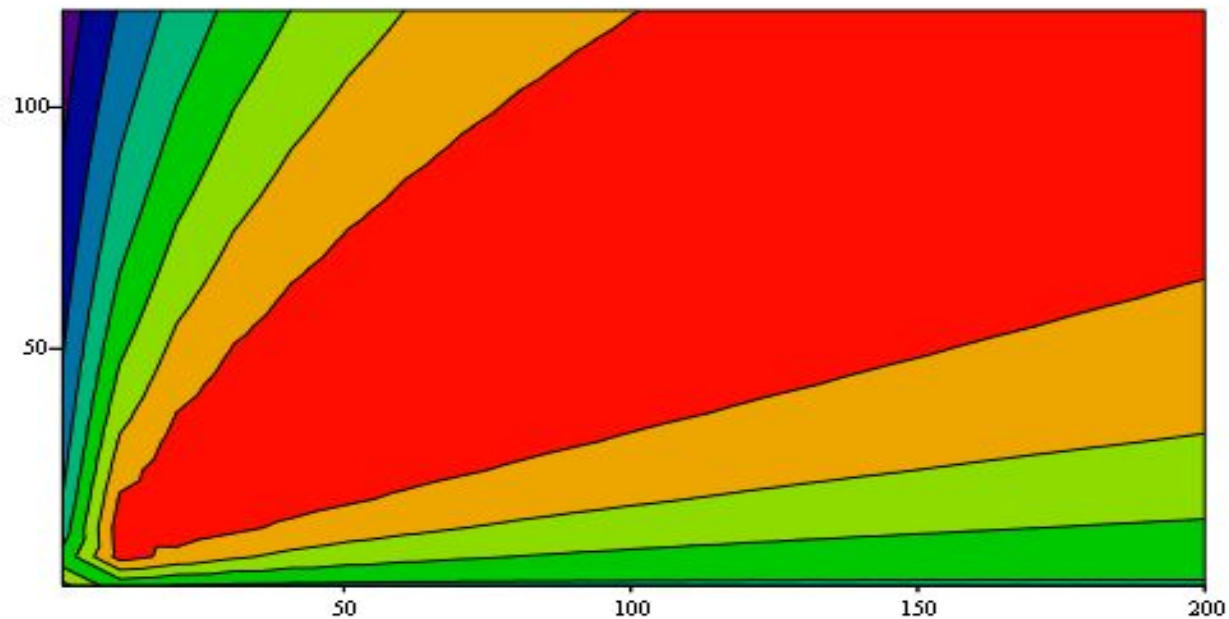


Пример 2 в Mathcad: удельная энергия связи как функция двух переменных - Z и N

$$a1 := 15.75 \quad a2 := 17.8 \quad a3 := 0.71 \quad a4 := 23.7$$

$$EE(N, Z) := a1 \cdot (N + Z) - a2 \cdot (N + Z)^{\frac{2}{3}} - a3 \cdot \frac{Z^2}{\sqrt[3]{N + Z}} - a4 \cdot \frac{(N - Z)^2}{N + Z}$$

$$EEA(N, Z) := \frac{EE(N, Z)}{N + Z}$$



EEA

* Литература:

- Мухин. Экспериментальная ядерная физика. Книга 1. Физика атомного ядра. Часть 1. Свойства ядра, нуклонов и радиоактивных излучений.
- Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, Н.П.Юдин Частицы и атомные ядра. Москва, 2002.
- Ю.М.Широков, Н.П.Юдин Ядерная физика. Москва «Наука»: 1980.
- <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e201.html>

СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ!