**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.

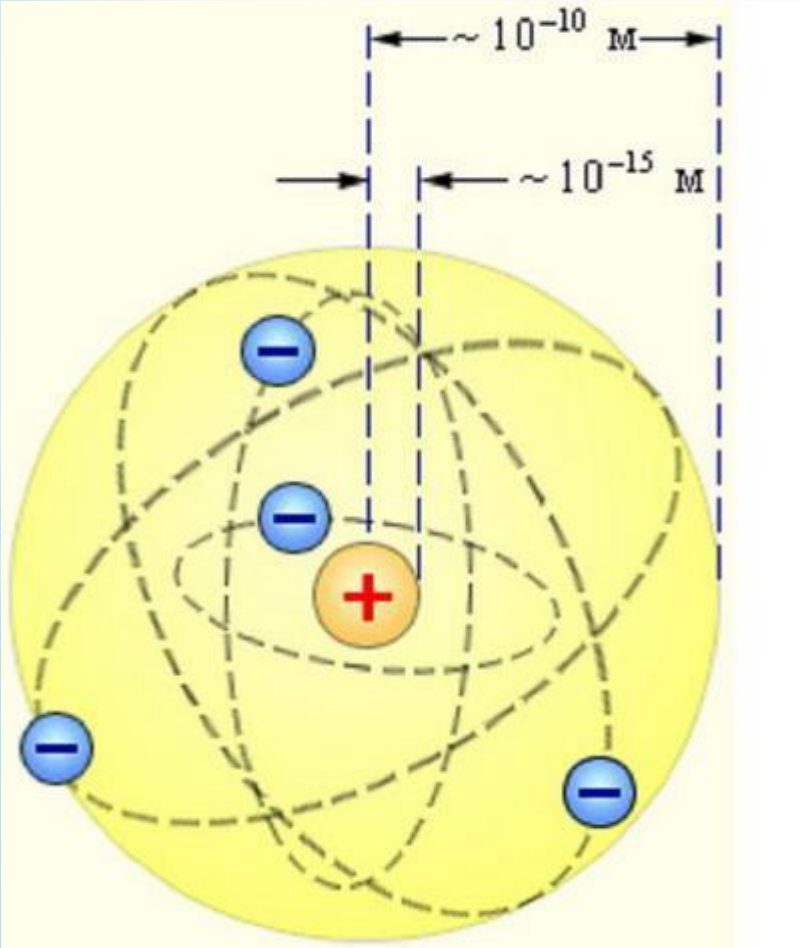
2017

*Вопросы

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

*Атомное ядро

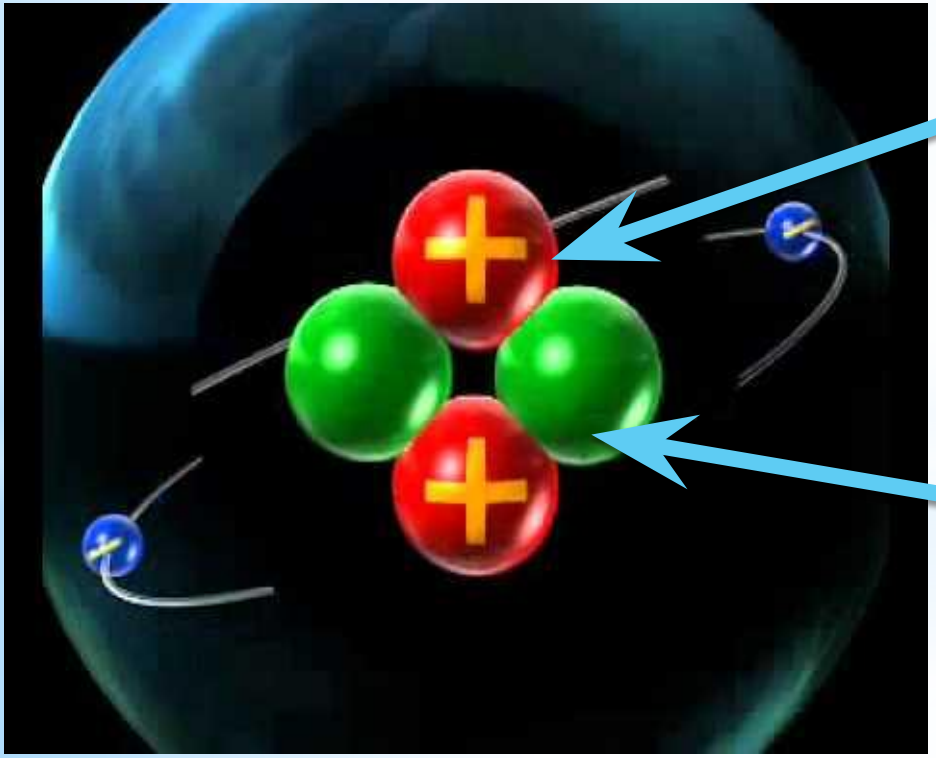
Атомное ядро – это центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся его масса и весь положительный электрический заряд.



- Большинство ядер имеют форму, близкую к сферической;
- Размеры ядра ≈ 10^{-14} - 10^{-15} м (размеры атома ≈ 10^{-10}м)
- Плотность вещества в ядре ≈ 230 млн. тонн/см^3.

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

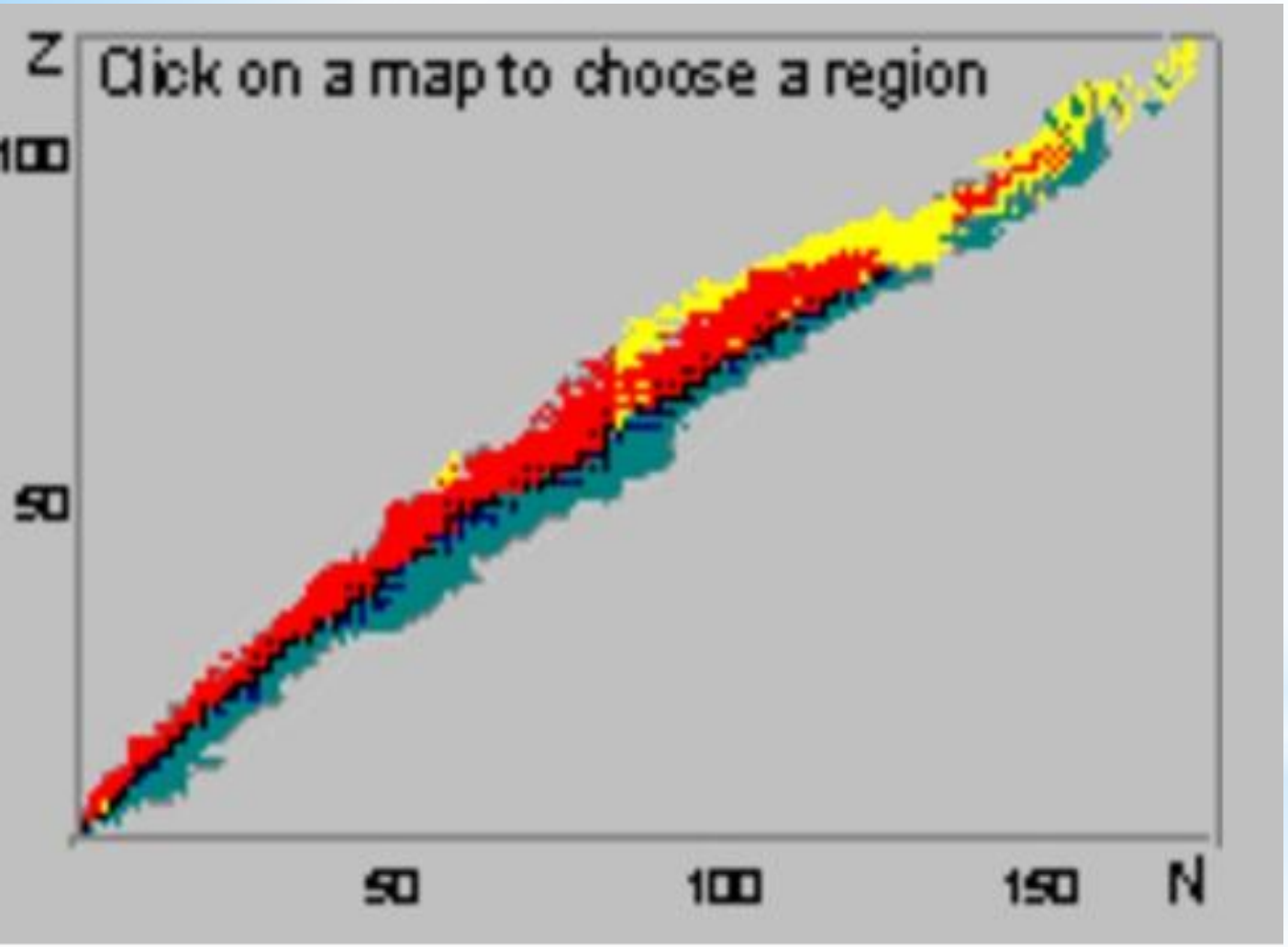
протонов ***p*** и нейтронов ***n***.



Протон-положительно заряженная частица и равен по модулю заряду электрона:q_p=+1,6 · 10^{-19}Кл, а масса m_p=1,6726 · 10^{-27}кг, четность +1, спин ½.

Нейтрон-это нейтральная частица, масса которой равна m_n=1,6749 · 10^{-27}кг не имеет заряда , четность +1, спин ½.

*Карта ядер



- stable
- α-decay
- $\beta^- - decay$
- $\beta^+ - decay$
- 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

<u>Для разрыва этих связей необходимо затратить определенную энергию.</u>

*Энергия связи ядра

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

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

$$m_p = 1.00728\ \text{а.е.м.}$$

$$m_n = 1.00867\ \text{а.е.м.}$$

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

$E=mc^2 = 931.5$ МэВ - энергия эквивалентная 1 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

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}})c^2$$ (***20 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		
		Experiment [2]	Theory [3]	Sh.corr. [3]
Sn^{100}	Mass Excess	-57.282972 (0.301518)	-57.870	-10.020
	BE	825.298	825.885	
	BE/A	8.253	8.259	
		Experiment [2]	Theory [3]	Sh.corr. [3]
U^{238}	Mass Excess	47.309112 (0.001881)	47.770	-1.270
	BE	1801.689	1801.228	
	BE/A	7.570	7.568	

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

$$\varepsilon = \frac{E_{св}}{A}$$

Удельная энергия является средней работой по удалению нуклона из ядра.

У легких элементов ε растет с ростом А. 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

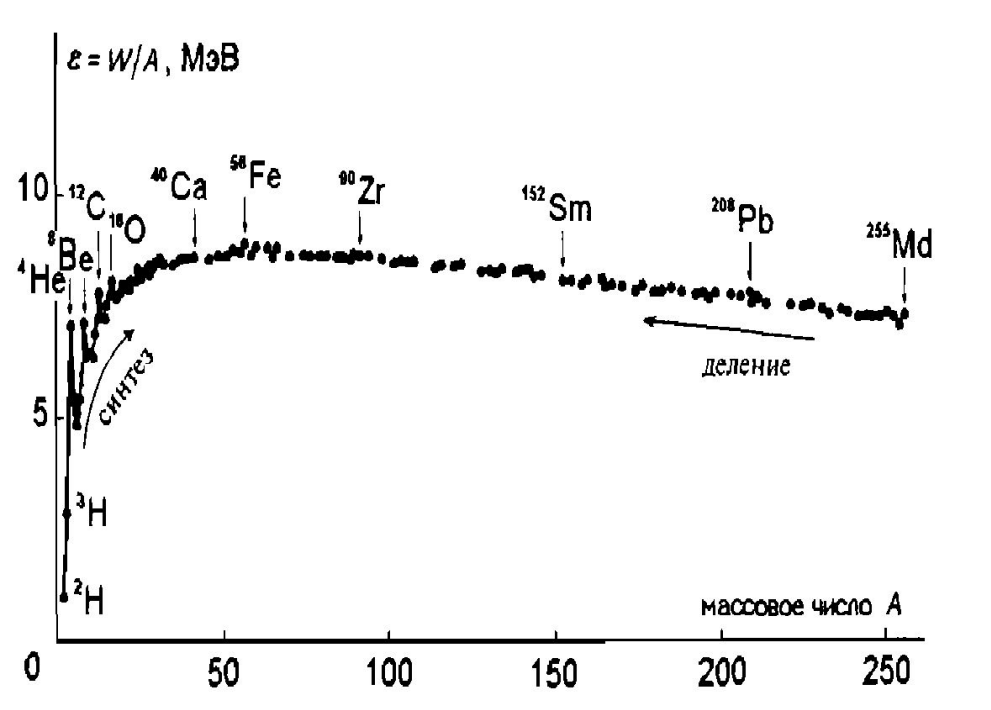


Рис.2. Примеры удельной энергий связи в NRV

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**		
		Experiment [2]	Theory [3]	Sh.corr. [3]
Sn^{100}	Mass Excess	**-57.282972** (0.301518)	*-57.870*	*-10.020*
	BE	**825.298**	*825.885*	
	BE/A	**8.253**	*8.259*	
		Experiment [2]	Theory [3]	Sh.corr. [3]
U^{238}	Mass Excess	**47.309112** (0.001881)	*47.770*	*-1.270*
	BE	**1801.689**	*1801.228*	
	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:

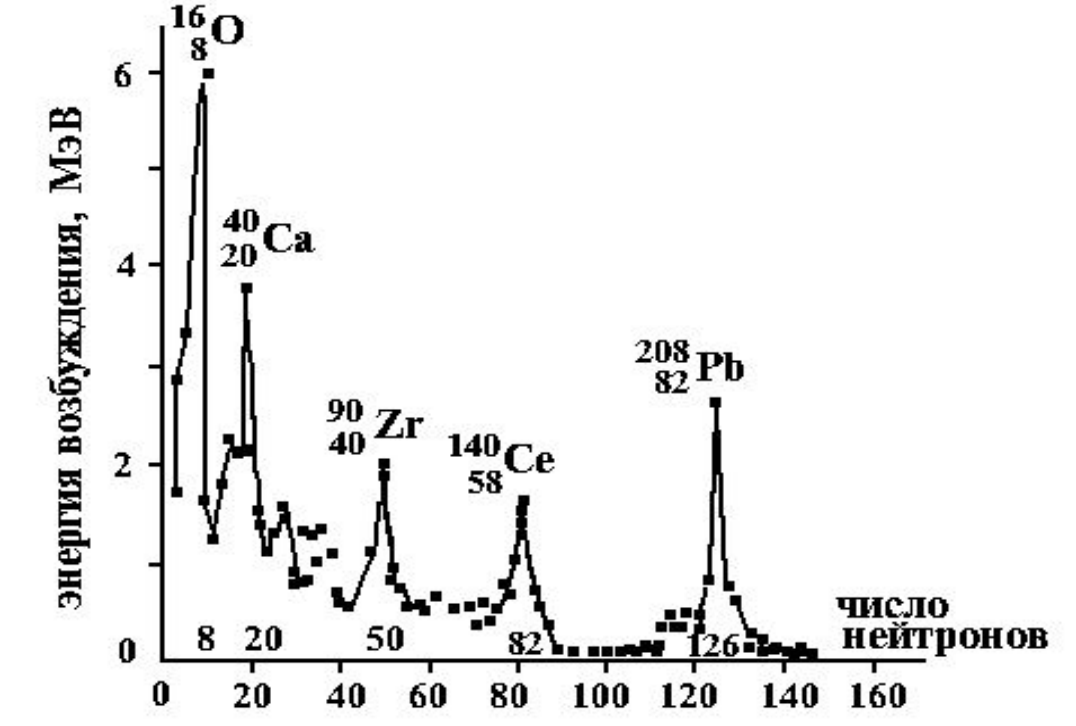
- Энергия связи больше, чем у соседних ядер;
- Повышенная распространённость в природе.

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.

$^{4}_{2}$, $^{16}_{8}$, $^{40}_{20}$, $^{208}_{82}$



*Полуэмпирическая 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 $R^2 = \left(r_o A^{1/3}\right)^2$, $r_o \approx 1.2 - 1.3$ 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

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

Кулоновские силы – дальнодействующие, 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 А 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

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

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

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:

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

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:

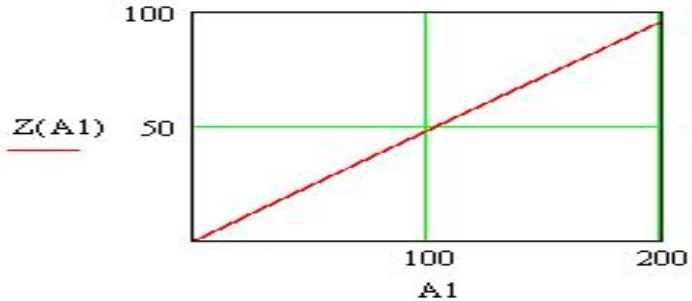
a = 15.75 МэВ;
b=17,8 МэВ;
c=0,71 МэВ;
d=23,7 МэВ;
δ=34 МэВ

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

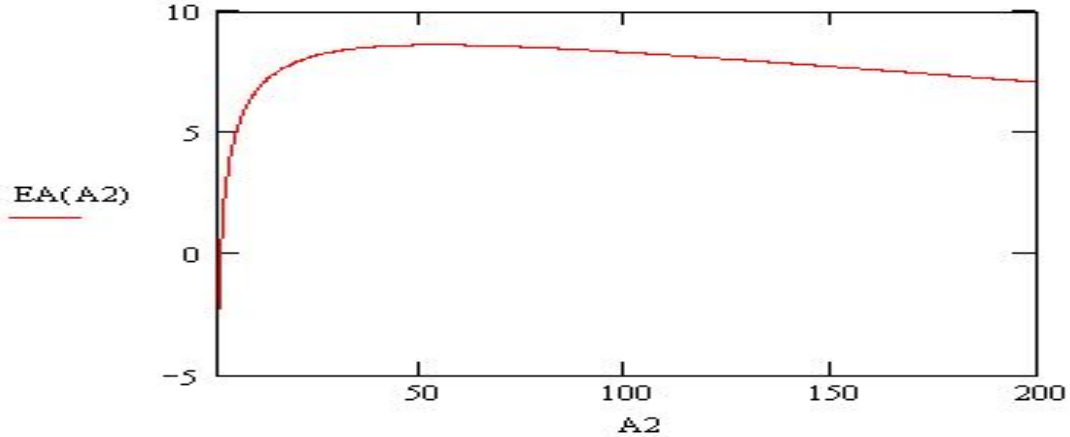
$a1 := 15.75 \qquad a2 := 17.8 \qquad a3 := 0.71 \qquad a4 := 23.7$

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



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

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

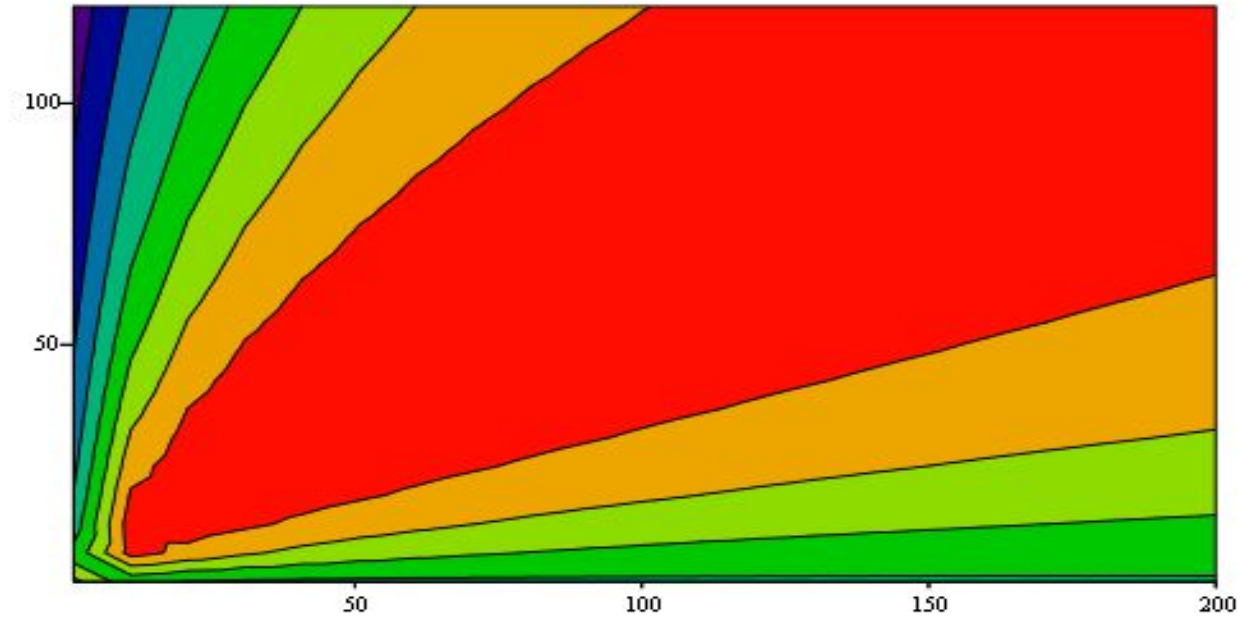


Пример 2 в Mathcad: удельная энергия связи как функция двух переменных – *Z* и *N*

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

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

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



*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!