КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
Физико-технический факультет
Кафедра теоретической и ядерной физики

«Радиологические измерения»

Лекция 2. Основы ядерной физики.

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

Цель лекции: сформировать у обучающихся представление о строении и основных характеристиках атомного ядра, фундаментальных взаимодействиях, классификации ядер и физических основах их устойчивости, включая массу и энергию связи.

Результаты обучения:

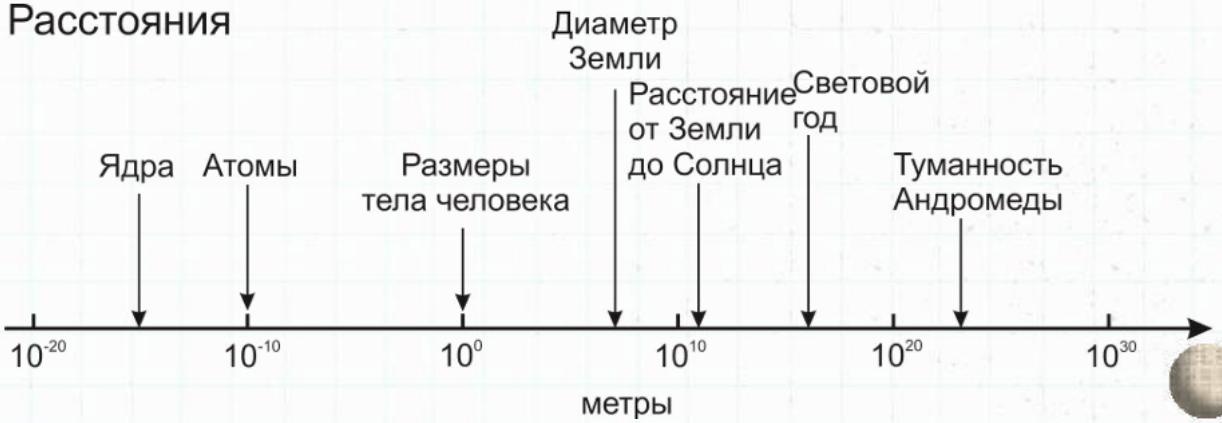
По завершении лекции обучающийся будет способен:

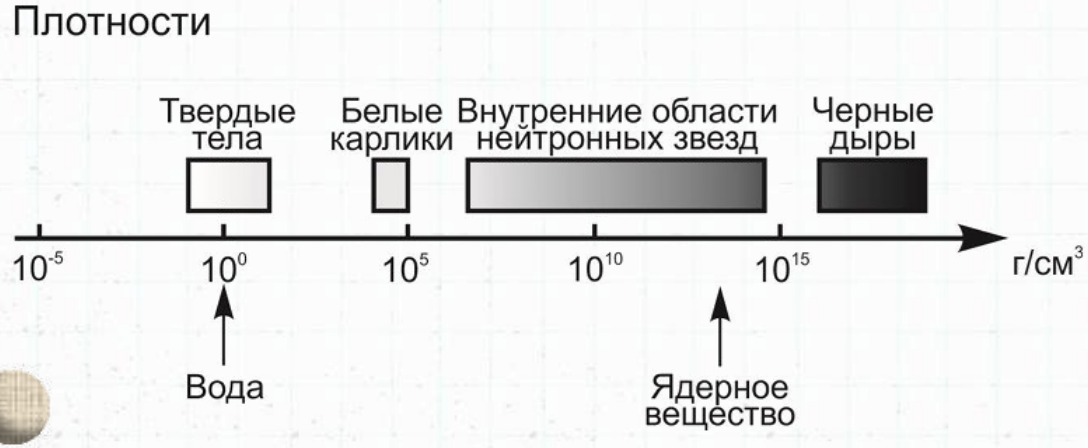
1. Описывать строение атома и атомного ядра, характеризовать свойства протонов и нейтронов.
2. Объяснять роль фундаментальных взаимодействий в строении и устойчивости атомных ядер.
3. Определять основные характеристики атомного ядра, включая зарядовое и массовое числа, массу и энергию связи.
4. Различать изотопы, изобары, изотоны и ядерные изомеры, приводить соответствующие примеры.
5. Рассчитывать энергию связи и удельную энергию связи ядра и объяснять их физический смысл.

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.



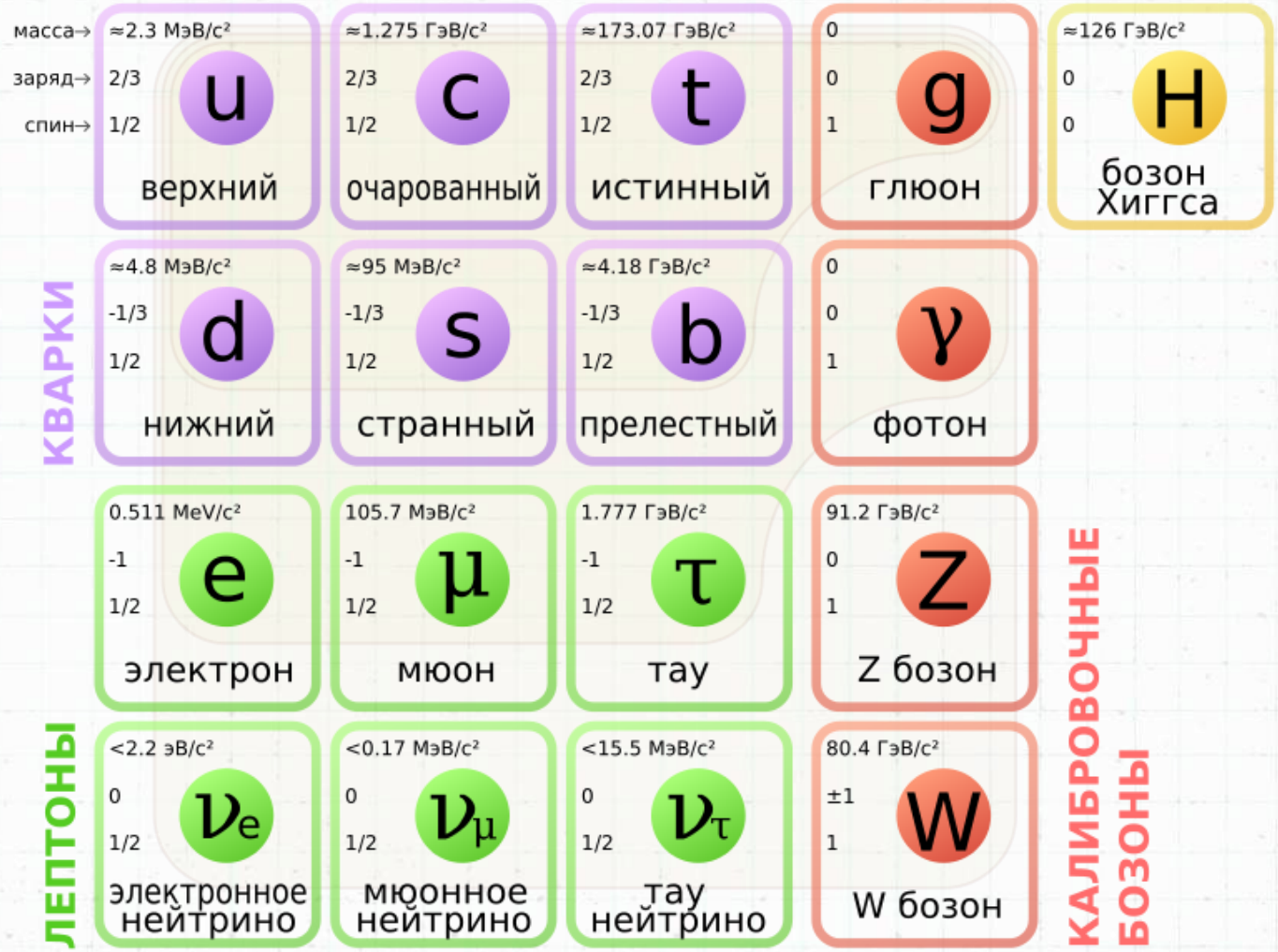


В качестве единицы энергии широко используется электронвольт (эВ).

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.

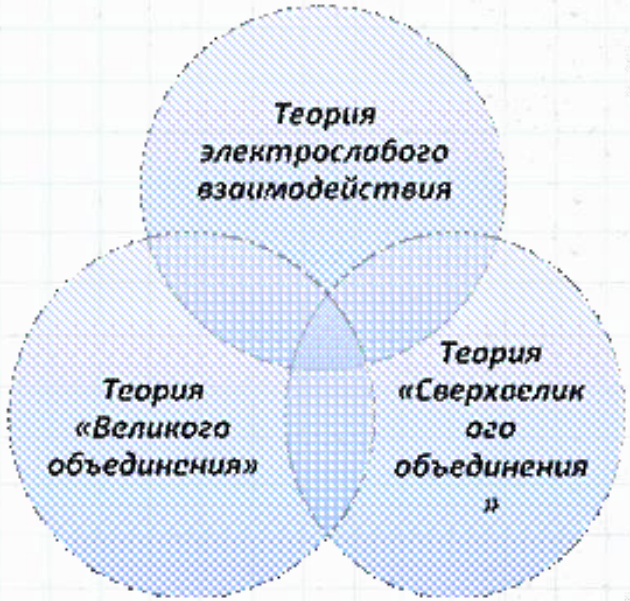
Стандартная модель



Фундаментальные взаимодействия

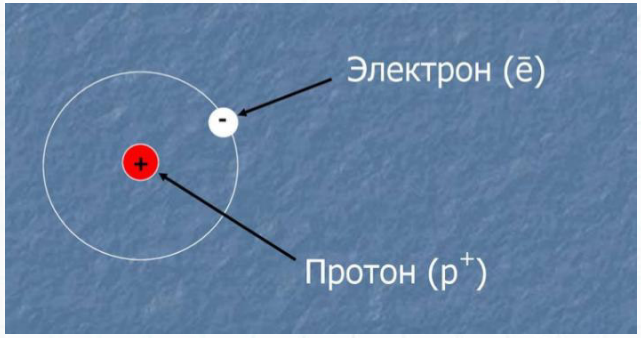
Вид	Взаимо-действующие частицы	Проявление	Механизм	Интенсив-ность	Радиус действия, м
СИЛЬНОЕ 	тяжелые частицы (кварки, нуклоны)	ядерные силы, обеспечивающие существование ядер	обмен глюонами	1	10^{-15}
ЭЛЕКТРО-МАГНИТНОЕ 	заряженные частицы, фотоны	кулоновская сила, обеспечивающая существование атома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





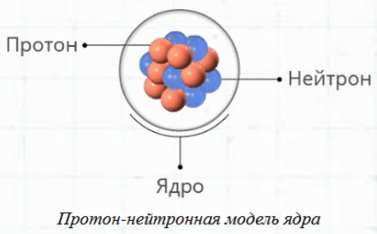
АТОМ [греч. ατομ - неделимый] - это структура материи, представляющая собой микрочастицу, состоящую из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов, связанных между собой электромагнитным взаимодействием.





НУКЛИД $_N^AY_Z$ – 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

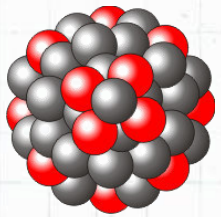
ЯДРО АТОМА ${}_N^A X_Z$ **–** это структура материи, представляющая собой микрочастицу, состоящую из нуклонов с различными зарядовыми состояниями (N нейтронов и Z протонов), связанных ядерными силами, то есть сильными взаимодействиями.

Основными характеристиками стабильного ядра являются:

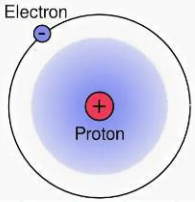
Массовое число - A
Электрический заряд - Z
Масса - M
Энергия связи - ΔE
Радиус - R
Спин - I
Магнитный момент - μ
Квадрупольный электрический момент - G
Изотопический спин - T
Четность волновой функции - P
Спектр возбужденных состояний - E_i

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

Спин - $s = \frac{1}{2}$

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

p

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 - $m_n = 1838{,}6 m_e = 1{,}008665 \ \ а.е.м.$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

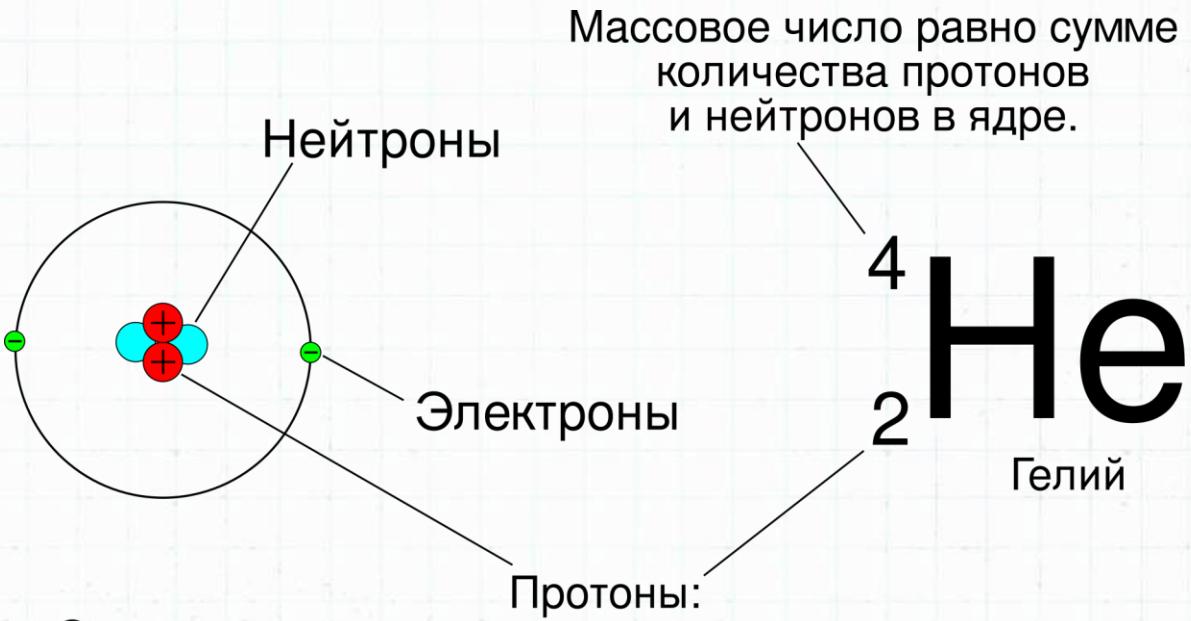
Магнитный момент - $\mu_n = -1{,}91 \mu_я$ *Заряд равен нулю!*

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

$$ {}^{A}_{N}X_{Z} $$

$ {}^{1}_{0}H_{1} $

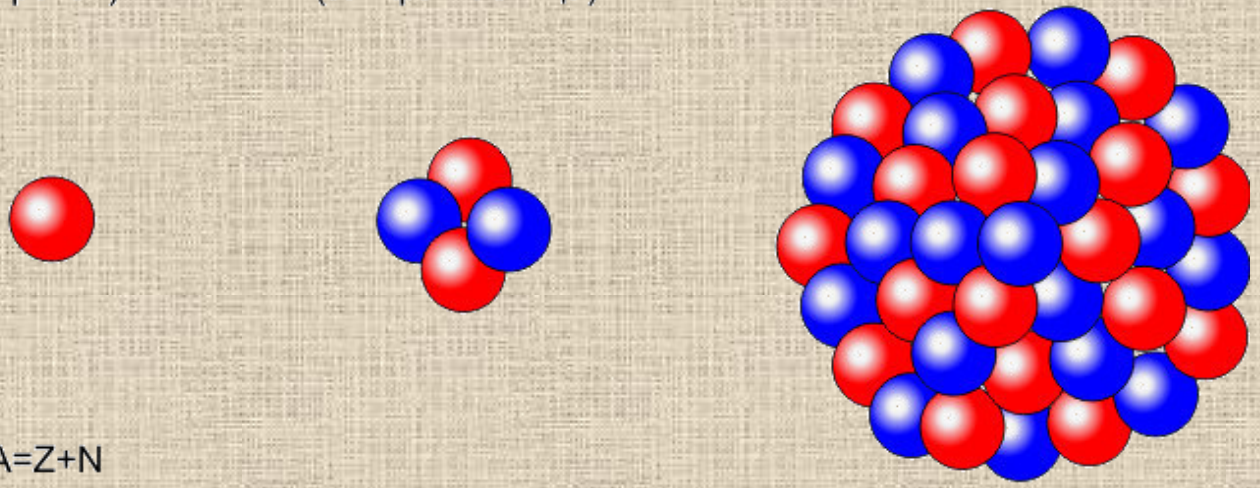
ядро водорода
(протон)

$ {}^{4}_{2}He_{2} $

ядро гелия
(альфа-частица)

$ {}^{235}_{143}U_{92} $

ядро урана



A=Z+N

нуклоны

- протон (Z)
- нейтрон (N)

$ T_{1/2} \approx 12\ мин \quad n \to p + \beta^{-} + \tilde{\nu}_{e} $

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

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

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

$$M_p = 1{,}00759 \text{ a.u.m.} = 938{,}2 \text{ MeV} = 1836 \cdot m_e$$

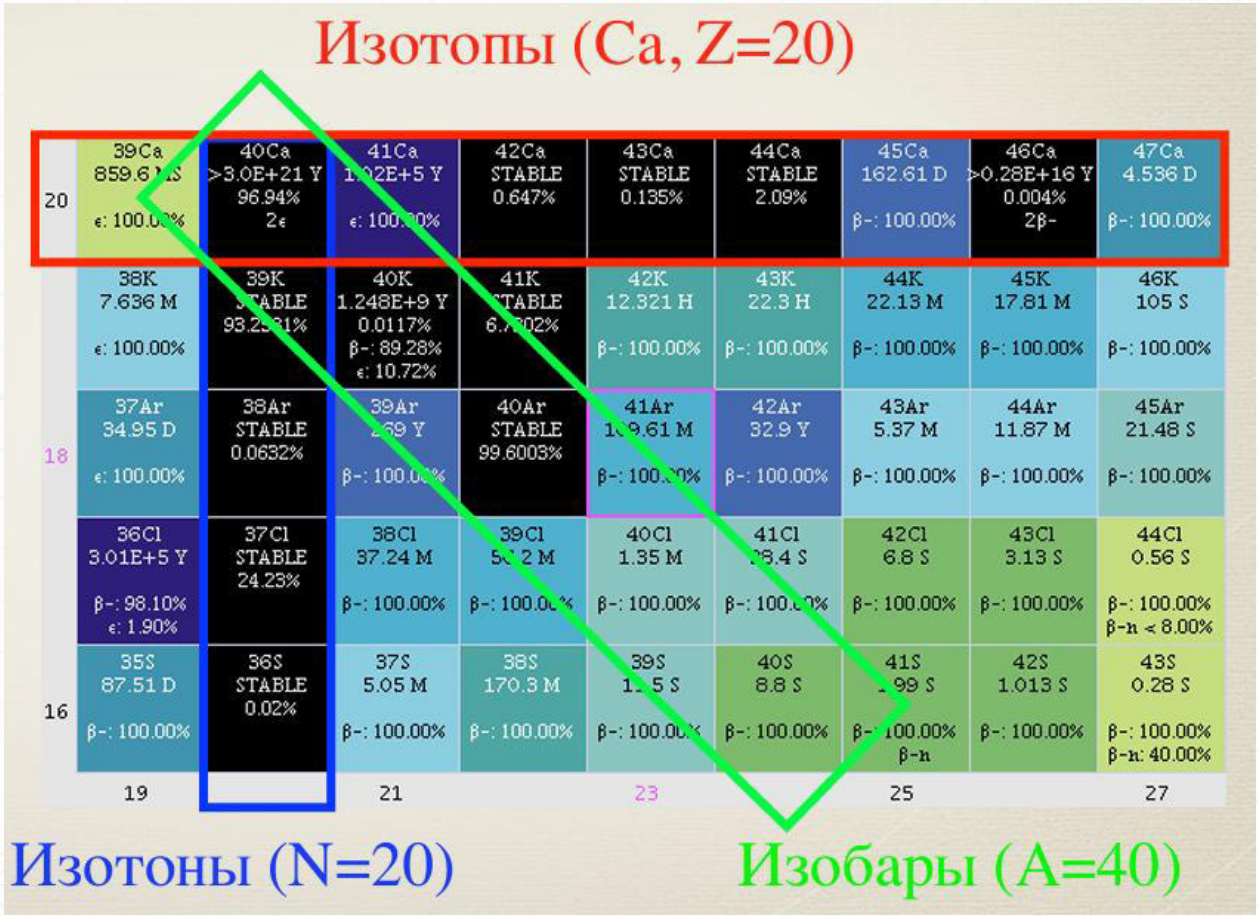
$$M_n = 1{,}00898 \text{ a.u.m.} = 939{,}5 \text{ MeV} = 1838{,}5 \cdot m_e$$

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

$$M(_N{}^AX_Z) = M(_N{}^AY_Z) - Zm_e + B_e(Z).$$

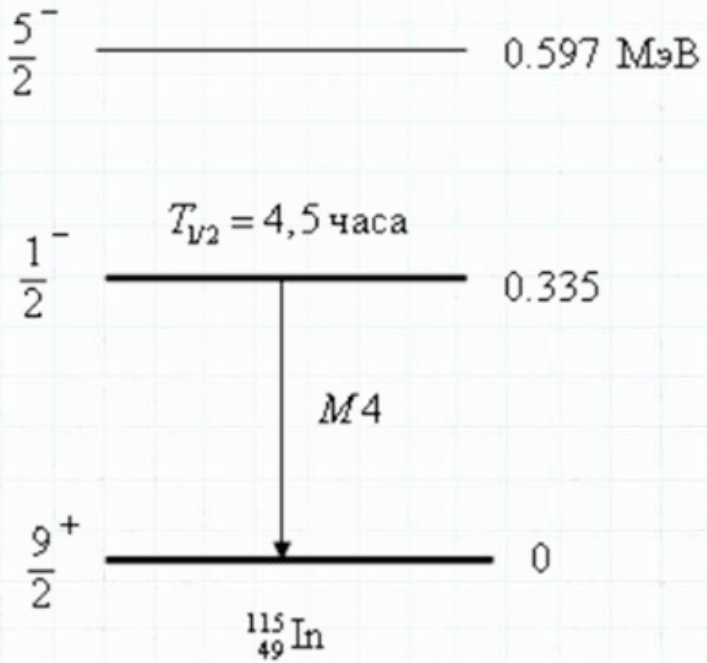
ИЗОТОПЫ – ядра, имеющие одно и то же Z, при разных N и A.

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



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 М и его массовым числом А

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***

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

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

$$\Delta m = \left[Z m_p + (A - Z) m_n - M_я (A, Z) \right]$$

$$\Delta m = \left[Z m(H^1) + (A - Z) m_n - M_{ат} (A, Z) \right]$$

Величина равная разности $M_{ат}(A, Z) - A$

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

Если использовать избыток массы, то можно записать

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

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

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

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 МэВ – коэффициент объемной энергии связи;

a_2=17,8 МэВ – коэффициент поверхностной энергии связи;

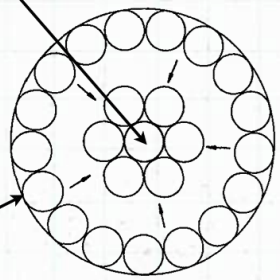
a_3=0,711 МэВ – коэффициент кулоновской энергии связи;

a_4=23,7 МэВ – коэффициент симметрической энергии связи;

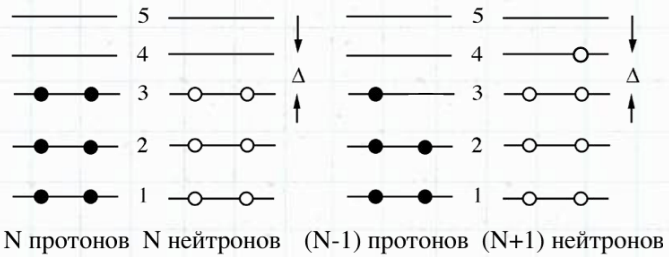
a_5= +34 МэВ; 0; -34 МэВ – коэффициент спаривательной энергии связи

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

Нуклоны, расположенные на поверхности ядра, имеют меньшее число связей, чем внутренние, поэтому полная энергия связи уменьшается на величину, пропорциональную поверхности ядра ~$A^{⅔}$



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

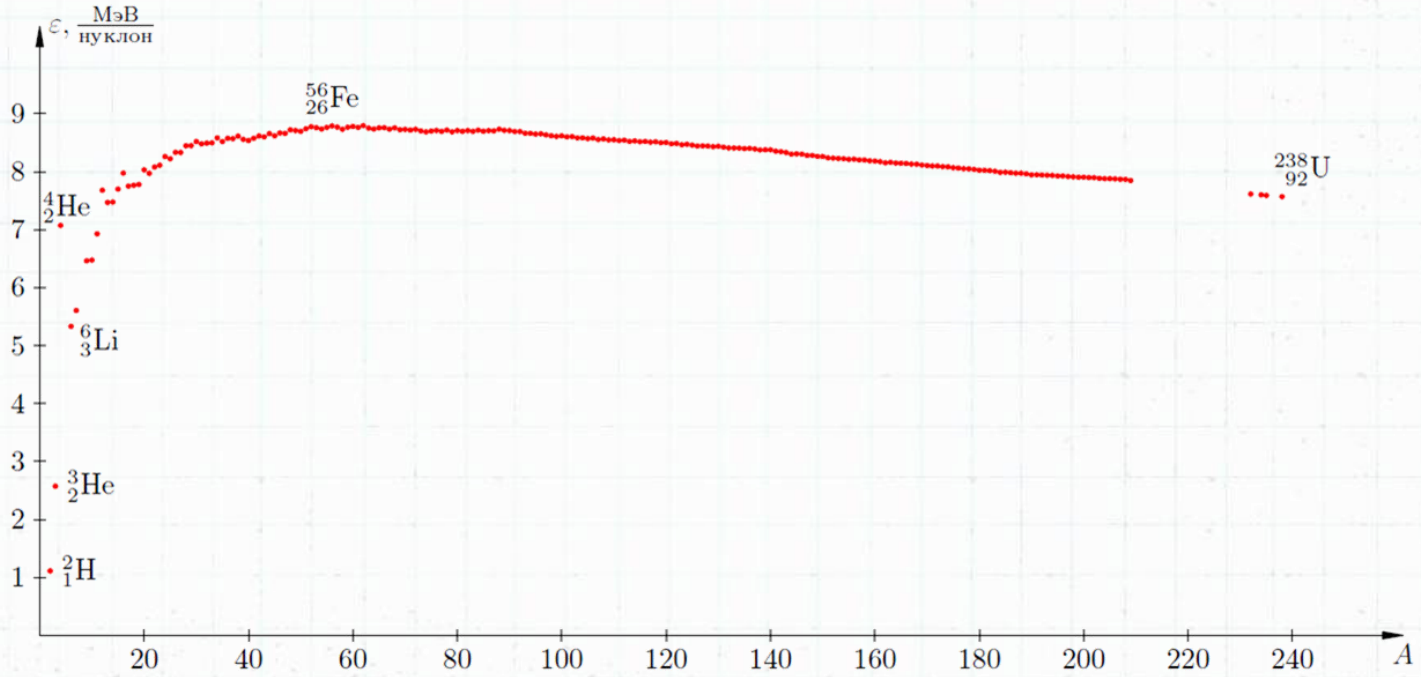


Кулоновская энергия сферы радиуса R с зарядом Z пропорциональна Z^2/R, поэтому энергия связи ядра уменьшается на величину ~ $Z^2/A^{⅓}$



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, … и четного числа нейтронов N= 0, 2, 4, … .

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

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, … и четного числа нейтронов N= 0, 2, 4, … .

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

Выводы:

1. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, связанных ядерными силами, а его основные характеристики определяются составом и свойствами нуклонов.
2. Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре, преодолевая электростатическое отталкивание протонов.
3. Атомные ядра классифицируются по числу протонов и нейтронов, массовому числу и энергетическому состоянию.
4. Масса и энергия связи ядра являются важнейшими характеристиками его структуры и устойчивости.
5. Удельная энергия связи зависит от массового числа и отражает закономерности устойчивости атомных ядер.

Вопросы для самопроверки:

1) Какие типы фундаментальных взаимодействий существуют в природе и какое из них удерживает протоны и нейтроны в атомном ядре?
2) Чем отличаются изотопы, изобары, изотоны и изомеры друг от друга? Приведите примеры.
3) Каковы основные физические характеристики стабильных и радиоактивных ядер?
4) Что такое нуклид и как он отличается от атома и изотопа?
5) В чём заключается физический смысл членов формулы Вейцзеккера для энергии связи ядра?
6) Докажите, что энергия связи атомного ядра может быть выражена через массу атома.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

