

**Ядро атома.
Ядерные силы.
Структура атомного ядра**

- На основе опытов Резерфорда была предложена *планетарная модель атома*:

$$r_{\text{атома}} = 10^{-10} \text{ м}, \quad r_{\text{ядра}} = 10^{-15} \text{ м}.$$

- В 1932 г. Иваненко и Гейзенберг обосновали *протон-нейтронную* структуру ядра, т.е. ядро состоит из элементарных частиц 2-х сортов – протонов и нейтронов. Число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке и совпадает с атомным номером элемента Z в таблице Менделеева.

Протон и нейтрон являются нуклонами, они обладают полуцелым спином, следовательно, они *фермионы* и относятся к группе *андронов, барионов*:

- протон: $m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $q_p = +e$;
 - нейтрон: $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $q_n = 0$;
- $$m_p \approx m_n \approx 1840 m_e .$$

Ядро – центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный заряд.

В ядерной физике массу частиц измеряют:

- в мегаэлектронвольтах МэВ, пользуясь соотношением $E = mc^2$,

$$m_p = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6} = 938,26 \text{ МэВ,}$$

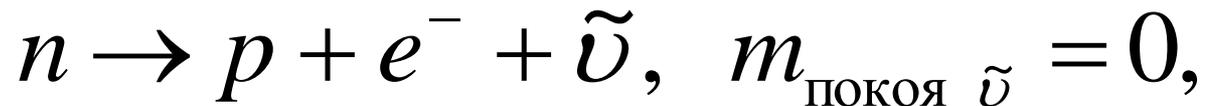
$$m_n = \frac{1,68 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6} = 939,55 \text{ МэВ;}$$

- в атомных единицах массы (а.е.м.):

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,4 \text{ МэВ.}$$

Протон – стабилен.

Нейтрон – в свободном состоянии нестабилен (радиоактивен), т.е. самопроизвольно распадается, превращаясь в протон и испуская e^- и антинейтрон:



период полураспада $T \sim 12$ мин.

Характеристики атомного ядра

Z – количество протонов, определяет заряд ядра, равный $+Ze$,

или зарядовое число. Определяет число электронов, конфигурацию их оболочек, т.е. химические свойства.

N – число нейтронов.

$A = N + Z$ – массовое число, равно числу нуклонов.

Для обозначения ядер применяется символ: ${}^A_Z X$, X – химический символ элемента.

Пример: кислород ${}^{16}_8 O$

16 – массовое число, 8 – атомное число (число протонов).

Ядра одного и того же химического элемента могут содержать различное число нейтронов и протонов.

- *Изотопы*: число протонов Z – одно, массовое число A – разное.

${}_{Z=1}^{A=1}H$ – водород; ${}_{Z=1}^{A=2}D$ – дейтерий ($N = 1$);

${}_{Z=1}^{A=3}T$ – тритий ($N = 2$).

- *Изобары*: массовое число протонов (число нуклонов) A – одно, число протонов Z – разное.

${}_{Z=81}^{A=210}Tl$ – талий; ${}_{82}^{210}Pb$ – свинец.

- *Изотоны* – одинаковое число нейтронов, $N = A - Z$.

${}^{13}_6\text{C}$ – углерод; ${}^{14}_7\text{N}$ – азот, $N = 7$.

Характеристики атомного ядра

- Радиус ядра – экспериментально показано, что

$$r = 1,3 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} [\text{м}] = 1,3 \cdot A^{1/3} [\text{ферми} = 10^{-15} \text{м}].$$

Следовательно, объём ядра пропорционален числу нуклонов $A = N + Z$ в ядре. 

- Плотность ядерного вещества примерно одинакова для всех ядер и $\approx 10^{17} \text{ кг/м}^3$, что значительно больше плотности обычных веществ.

Ядерные силы

Силы, удерживающие нуклоны в ядре, называются *ядерными силами* – это силы притяжения, отличны от сил, известных в классической механике.

Ядерные силы, действующие между двумя нуклонами в ядре, по порядку величины в 100 раз больше электростатического взаимодействия между протонами, следовательно, это *сильное взаимодействие*.

Свойства ядерных сил

1. *Короткодействующие* – действуют на расстоянии $< 10^{-15}$ м и являются силами притяжения.
2. *Зарядовая независимость*, т.е. не зависят от заряда нуклонов: $F_{n-n} = F_{p-p} = F_{p-n}$.
3. *Зависит от ориентации* спинов взаимодействующих нуклонов.

Пример: только при параллельных спинах p и n могут образовать ядро атома дейтерия

$$p\left(\uparrow L_s = \frac{1}{2}\right) + n\left(\uparrow L_s = \frac{1}{2}\right) = {}_1^2D(L_s = 1). \Rightarrow$$

Свойства ядерных сил

4. Ядерные силы *не являются центральными*, т.е. их нельзя представить направленными вдоль одной прямой.
5. Свойство *насыщения*, т.е. каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов (обычно – 6).

Пример: ${}_{92}^{235}\text{U}$, количество протонов $Z = 92$,
количество нейтронов $A - Z = 235 - 92 = 143$.

Если в уран ${}_{92}^{235}\text{U}$, попадает ещё один n , то это ядро становится неустойчивым и делится на 2 частицы, т.е. ядерные силы одновременно удерживать 144 n и 92 p не могут.

Свойства ядерных сил

6. Ядерные силы носят *обменный характер*, т.е. нуклоны виртуально обмениваются частицами – *мезонами* (π^0, π^-, π^+) , которые являются носителями поля ядерных сил, по примеру того, как взаимодействие между заряженными частицами осуществляется через электромагнитное поле, которое можно представить в виде совокупности квантов энергии – фотонов. Заряд мезонов

$$|\pi^-| = |\pi^+| = |e^-|.$$

Единой модели ядра нет.

- *Капиллярная модель* – ядро рассматривается в виде жидкой капли. При этом нуклоны обладают энергией:

+ E_1 – внутри ядра,

+ E_2 – на поверхности ядра,

- E_3 – энергия за счёт электростатических сил отталкивания,

энергия связи ядра $E_{св} = E_1 + E_2 - E_3$.

- *Оболочечная модель*: каждый нуклон в ядре находится в определённом квантовом состоянии с энергией E_n .
- *Ротационная модель*: ядро представляет собой эллипсоид вращения.

Энергия связи ядра и дефект масс

Между нуклонами действуют силы притяжения, т.к. ядро, состоящее из протонов и нейтронов, представляет собой устойчивое образование.

- Понятие энергии связи отдельного нуклона в ядре.

Энергия связи нуклона в ядре – физическая величина, равная работе, которую необходимо совершить для удаления нуклона из ядра в бесконечность без сообщения ему кинетической энергии.

Энергия связи ядра

- *Полная энергия связи* численно равна работе, которую необходимо совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны без предания им кинетической энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что при образовании из нуклонов ядра должна выделиться энергия равная энергии, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро, т.е. энергия связи ядра. 

Энергия связи – разность между суммарной энергией свободных нуклонов, составляющих ядро, и их энергией в ядре:

$$E_{св} = c^2 \left(\left[\underbrace{Z}_{N_p} \cdot m_p + \underbrace{(A - Z)}_{N_n} \cdot m_n \right] - m_{я} \right). \quad (1)$$

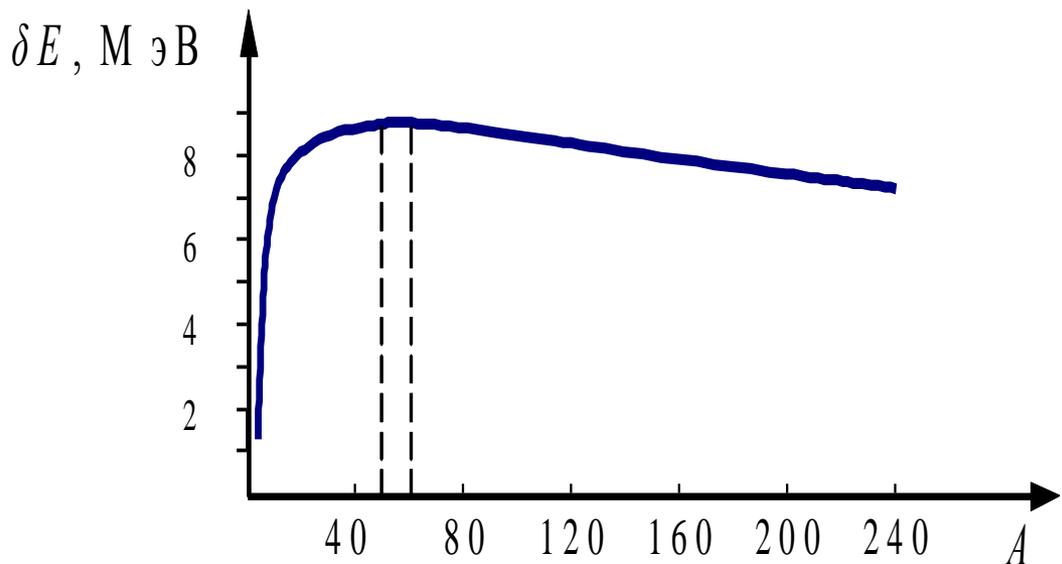
$m_e \ll m_p; m_p \approx m_n \Rightarrow m_{ядра} \approx m_{атома},$
 $m_p = m_{атома \text{ водорода}} = m_H.$

$$E_{св} = c^2 \left([Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n] - m_{ат} \right). \quad (2)$$

$$E_{св} = c^2 \left([Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n] - m_{ат} \right). \quad (2)$$

Как правило, применяется уравнение (2), т.к. обычно даётся не масса ядер, а масса атомов, а замена $m_p \rightarrow m_H$; $m_я \rightarrow m_{ат}$ практически не влияет, т.к. ведёт к добавке к (Zm_p) и $(m_я)$ величины равной (Zm_e) , которой пренебрегают по причине ничтожно малой величины связи электрона с ядром.

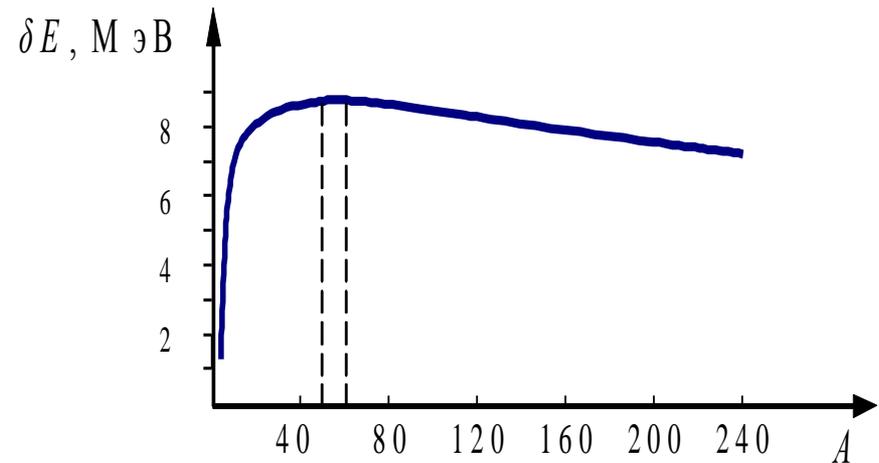
Удельная энергия связи – энергия связи,
приходящаяся на один нуклон $\delta E = \frac{E_{св}}{A}$.



Характеризует устойчивость атомных ядер, т.е.
чем больше δE , тем устойчивее (прочнее)
ядро.

В ядре наиболее сильно связаны нуклоны ядер с
 $A = 50 \div 60$, их удельная энергия связи $\delta E \approx$
8,7 МэВ/нуклон.

Удельная энергия связи



С ростом массового числа A удельная энергия связи уменьшается до $\approx 7,5$ МэВ/нуклон, это объясняется тем, что с ростом A растёт число протонов p и, соответственно, энергия их кулоновского отталкивания.

Ядра средней части таблицы Менделеева наиболее устойчивы в энергетическом смысле.

Удельная энергия связи

Наиболее стабильны *магические ядра*, у которых N_p или N_n равны 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 – магические числа. Особенно стабильны дважды магические ядра, у которых N_p и N_n равны магическим числам. Таких ядер пять:

$${}_{N_p=Z=2}^{A=4}\text{He} \quad (N_n = A - Z = 4 - 2 = 2);$$

$${}_{8}^{16}\text{O}; \quad {}_{20}^{40}\text{Ca}; \quad {}_{20}^{48}\text{Ca}; \quad {}_{82}^{208}\text{Pb}.$$

Удельная энергия связи

Зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически выгодными 2 процесса:

1. деление тяжёлых ядер на несколько более лёгких,
2. слияние (синтез) лёгких ядер в одно ядро.

В обоих этих случаях должна выделиться значительная энергия.

Пример: при «сгорании» 1 атома угля выделяется всего ~ 5 эВ.

1 процесс: делится ядро с массовым числом $A_1 = 240$ ($\delta E_1 \approx 7,5$ МэВ/нуклон) на 2 ядра с $A_2 = 120$ ($\delta E_2 \approx 8,5$ МэВ/нуклон).

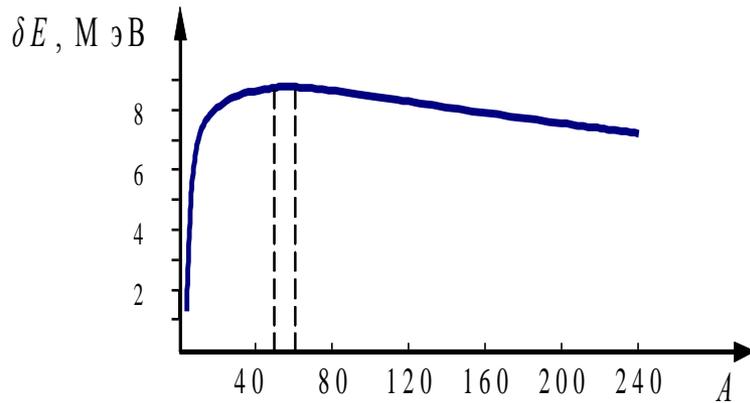
Это приводит к выделению энергии

$$\delta E_2 \times 2 A_2 - \delta E_1 \times A_1 = 240 \text{ МэВ} \text{ или } 1 \text{ МэВ/нуклон.}$$

Для того чтобы разделиться на несколько частей тяжёлое ядро должно пройти через несколько промежуточных состояний, $E_{св}$ которых больше основного состояния ядра. Следовательно, для процесса деления ядру необходимо сообщить дополнительную энергию (активация), например, облучить ядро нейтронами или другими частицами.

2 процесс: слияние 2-х ядер водорода ${}^2_1\text{H}$
в ядро гелия ${}^4_2\text{He}$ привело бы к выделению
энергии ~ 24 МэВ.

Но для их слияния они должны подойти друг к
другу на расстояние $\sim 10^{-15}$ м, чему
препятствует кулоновское отталкивание. Для
того чтобы преодолеть его ядра должны
двигаться с огромной скоростью,
соответствующей температуре $\sim 100 \cdot 10^6$ °С.
Этот процесс реализуется при термоядерной
реакции.



- Характер зависимости $\delta E(A)$ определяется конкуренцией ядерных сил притяжения и электростатических сил отталкивания. Чем больше A (т.е. Z), тем сильнее влияют на характер зависимости протоны:

$$F_{\text{Кл}} \sim \frac{q^2}{r^2} \sim Z^2.$$

Поэтому прочность ядер при больших Z снижается.

Дефект масс Δm .

$$E_{св} = c^2 (Z \cdot m_z + N_n \cdot m_n - m_{я}) = c^2 \cdot \Delta m,$$

масса нуклонов $Z \cdot m_z + N_n \cdot m_n > m_{\text{ядра}}$.

На Δm уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

Радиоактивность

Радиоактивность (радиоактивный распад) – самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер.

Естественная радиоактивность наблюдается у существующих в природе неустойчивых изотопов.

Искусственная радиоактивность – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.