

## Лекция2.

### Атом, атомное ядро, атомная энергия

- Ядро атома химического элемента состоит из положительно заряженных и нейтральных нуклонов, называемых соответственно протонами  $p$  и нейтронами  $n$ .
- Атомы, ядра которых состоят из разного числа нуклонов или при одинаковом числе нуклонов содержат различное число протонов и нейтронов, называют нуклидами.
- Заряд протона равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл (единичный заряд). Масса покоя протона равна  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг.  
Протон — это ядро атома водорода.
- Нейтрон не имеет заряда.
- Масса покоя нейтрона равна  $= 1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг.
- В свободном состоянии нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино с периодом полураспада 11,7 с.

- Количество протонов в ядре  $Z$  определяет его заряд, т. е. порядковый номер элемента в периодической таблице элементов Д. И. Менделеева.
- Сумма чисел протонов и нейтронов в ядре называется массовым числом  $A = Z + N$ .
- Ядро элемента  $X$  обозначают так:  ${}_Z^A X$ . Например, ядро атома водорода записывается следующим образом  ${}_1^1 \text{H}$ , гелия —  ${}_2^4 \text{He}$ , урана —  ${}_{92}^{235} \text{U}$  и т. п.
- В ядерной физике массу частиц выражают в атомных единицах массы (а. е. м.). Одна а. е. м. определена как  $1/12$  массы нуклида  ${}_{6}^{12} \text{C}$  и равна  $1,6605 \cdot 10^{-27}$  кг.
- Массы нуклонов очень близки к 1 а. е. м., поэтому массовое число  $A$  с точностью до целого числа а. е. м. определяет массу ядра.

- Нуклиды с одинаковым числом протонов  $Z$ , но различным числом нейтронов  $N$ , принадлежат одному химическому элементу, но имеют различную массу, и называются изотопами. Например, изотопами водорода являются легкий водород  ${}^1_1\text{H}$ , дейтерий  ${}^2_1\text{D}$ , тритий  ${}^3_1\text{H}$ ; изотопами урана являются  ${}^{233}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и т. п.
- Для простоты описания ядерных реакций удобно представлять ядро в виде шара . Радиус ядра с массовым числом  $A$  равен:
 
$$R_{\text{я}} \approx 1,45 * 10^{-15} A^{1/3} \text{ м} \quad (\text{п .1.1})$$
- Внутри ядра между нуклонами действуют три вида сил: ядерные, электростатические и гравитационные.
- Ядерные силы притяжения между нуклонами обладают свойствами **равнодействия** (независимости от заряда), **близкодействия** (радиус действия  $\sim 10^{-15}$  м), **насыщения** (взаимодействие только в пределах соседних нуклонов).
- Ядерные силы на два порядка сильнее электромагнитных сил.

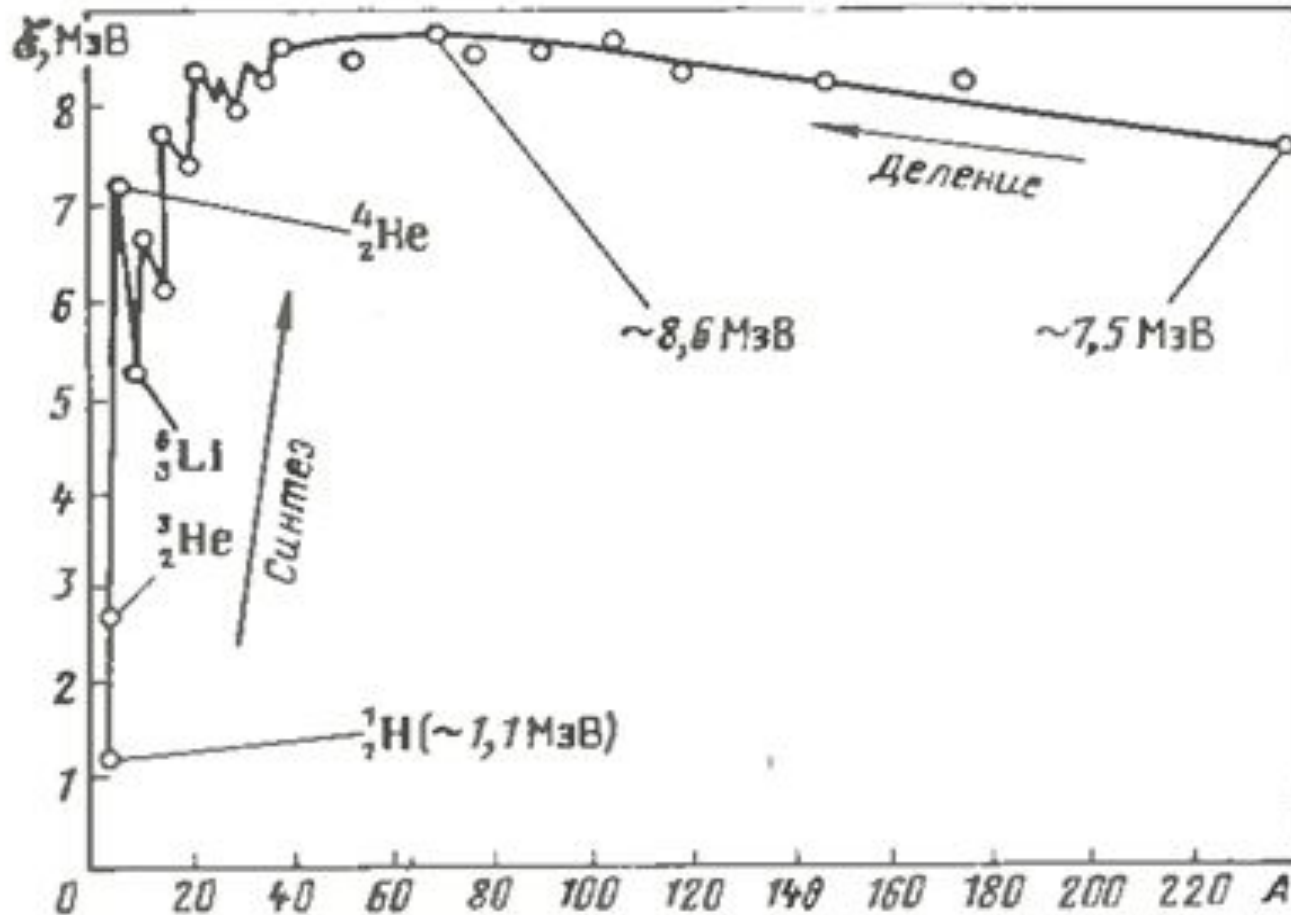
- Суммарная энергия взаимодействия нуклонов в ядре — это энергия связи ядра она равна работе, которую необходимо совершить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны или, иначе говоря, равна энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных нуклонов.
- Изменение энергии в ядре происходит в соответствии с законом Эйнштейна—взаимосвязи массы  $m$  (кг) и энергии  $E$  (Дж):
  - $E = mc^2$  Дж
  - где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме.
  - Вещество с массой 1 кг обладает энергией
$$E = mc^2 = 1(3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10 \text{ кВт ч.}$$
- *Энергия, заключенная в 1 кг вещества, примерно равна теплоте сгорания  $2,1 \cdot 10^6$  т нефти или  $3 \cdot 10^6$  т угля.*

- В ядерной физике за единицу энергии принимается один **электрон-вольт(эВ)**.
- Один электрон-вольт равен энергии, которую приобретает электрон ( его заряд равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл ) при прохождении точек электрического поля, разность потенциалов между которыми равна 1В.
- Работа, совершаемая в этом поле над зарядом равным 1Кл, равна 1Дж;  
тогда  $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж, или  $1\text{Дж} = 6,25 \cdot 10^{18}$  эВ.
- При рассмотрении ядерных реакций, в которых участвуют ядерные силы намного превышают силы атомных взаимодействий, используют единицу равную  
 $10^6$  эВ = 1 МэВ.
- Энергия массы, равной 1 а.е.м.:  
 $E = mc^2 = 1,6605 \cdot 10^{-27} (3 \cdot 10^8)^2 = 1,49 \cdot 10^{-10}$  Дж = 931м МэВ.

- Разность между суммой масс частиц (нуклонов), составляющих ядро и массой ядра, называется избытком массы.  
Так, избыток массы для  $^{12}\text{C}$  составляет 0,098922 а.е.м. Если этот дефект массы выразить в энергетических единицах в соответствии с соотношением Эйнштейна между массой и энергией  $E=mc^2$  ( $c$  - скорость света в вакууме), то получится величина 92,1626 МэВ.
- Энергия, эквивалентная избытку массы, называется энергией связи сложной частицы -  $E_{\text{св}}$ .
- Энергия связи нуклона есть энергия, которая идет на возбуждение ядра при поглощении им нуклона и может выделиться при испускании гамма-кванта или какой-либо другой частицы.
- Напротив, для испускания нуклона ядро должно получить извне энергию не менее энергии связи.
- Удельная энергия связи нуклона примерно одинакова для большинства ядер:  $\epsilon_{\text{св}} \approx (8 \pm 1) \text{ МэВ}$  (рис. 1).

Исключение составляют самые легкие ядра, удельная энергия связи которых сильно зависит от состава ядра. Так, удельная энергия связи дейтерия (протон и нейтрон) составляет около 1 МэВ. Далее с ростом числа нуклонов  $\epsilon_{\text{св}}$  быстро растет, достигая максимальных значений при  $A=50-60$ . Нуклиды с такими массовыми числами наиболее устойчивы. Для  $^{62}_{28}\text{Ni}$  имеем  $\epsilon_{\text{св}} = 8,8 \text{ МэВ}$ .

Рис. 1. Зависимость средней удельной энергии ( $E_{св}$ ) связи нуклона от массового числа.



## 2.1. Устойчивость ядер.

- Из факта убывания  $E_{\text{св}}$  для нуклидов с массовыми числами больше или меньше 50-60 следует, что для ядер с малыми  $A$  энергетически выгоден процесс слияния - термоядерный синтез, приводящий к увеличению массового числа, а для ядер с большим  $A$  - процесс деления.
- В настоящее время оба эти процесса, приводящие к выделению энергии, осуществлены, причём последний лежит в основе современной ядерной энергетики, а первый используется в термоядерном оружии, его мирное применение находится в стадии освоения.

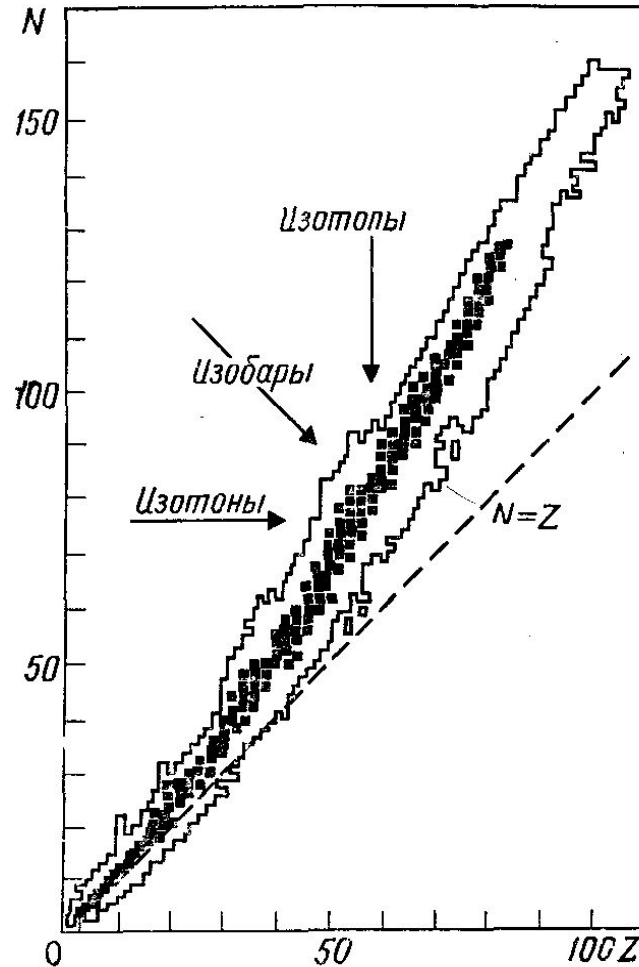


- Устойчивость ядер существенно зависит от  $(A-Z)/Z$  - отношения чисел нейтронов и протонов. Ядра лёгких нуклидов наиболее устойчивы при  $(A-Z)/Z = 1$ .
- С ростом массового числа становится всё более заметным электростатическое отталкивание между протонами, и область устойчивости сдвигается к значениям  $(A-Z)/Z > 1$ .
- Для наиболее тяжёлых нуклидов  $(A-Z)/Z = 1.5$ .

Рис.2.

Диаграмма протон-нейтронного состава нуклидов. Энергии связи ядра  $E_{св}$ .

На диаграмме все изотоны данного нуклида располагаются по горизонтальным рядам, изотопы - по вертикальным, а изобары - по диагоналям, перпендикулярным биссектрисе координатного угла.



- Приведенная диаграмма позволяет выявить ряд характерных закономерностей.
- 1. Стабильные нуклиды располагаются в виде узкой дорожки, показывающей протон - нейтронный состав ядра, которому соответствует минимальная внутренняя энергия ядра при данном числе  $A$  нуклонов. Все нестабильные нуклиды занимают достаточно широкую полосу, обрамляющую эту узкую дорожку (рис. 2).
- 2. Легкие стабильные ядра лежат на биссектрисе координатного угла ( $N=Z$ ).. Последним стабильным ядром с равным числом нейтронов и протонов является  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$  .
- 3. При значениях  $Z>20$  отношение  $N/Z$  начинает отклоняться вверх от прямой  $N=Z$ . Чем тяжелее ядро, тем больше отклонение. Например,  $N/Z \approx 1,54$  для  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$

- Все нестабильные тяжелые нуклиды в результате  $\alpha$ -распада переходят в стабильные нуклиды.
- 5. Выше дорожки стабильных ядер располагаются  $\beta^-$ -активные нуклиды, перегруженные нейтронами. Они в результате  $\beta^-$ -распадов опускаются по изобарным линиям, пока не перейдут в соответствующие стабильные нуклиды. Ниже области стабильных ядер находятся  $\beta^+$ -активные нуклиды, недогруженные нейтронами, которые в результате ядерных превращений сдвигаются по изобарным линиям вверх до превращения в стабильные ядра.

- **Энергии связи ядра  $E_{\text{св}}$  .**
- **Энергии связи ядра  $E_{\text{св}}$  соответствует дефект массы  $\Delta m$  ядра, который равен разности между суммой масс покоя нуклонов, составляющих ядро, и массой ядра:**
  - $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$ , (п. 1.6)
  - где  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_{\text{я}}$  — масса протона, нейтрона и ядра соответственно, а. е. м. В этом случае
  - $E_{\text{св}} = 931 \Delta m \text{ МэВ}$ . (п. 1.7)
- **Энергия связи может быть выражена через массы нейтральных атомов — исходного  $M$  и атомов водорода  $M_{\text{H}}$ :**
  - $E_{\text{св}} = 931 [ZM_{\text{H}} + (A - Z)m_n - M] \text{ МэВ}$ . (п. 1.8)
  - Формула (п 1.8) более удобна, так как в справочных таблицах обычно даются массы атомов, а не ядер. Массы электронов атомов, которые входят в эту формулу, автоматически исключаются, так как они берутся до и после реакции с разными знаками

- **Отношение полной энергии связи ядра к массовому числу дает среднее значение энергии связи на один нуклон и называется удельной энергией связи:**
- $\varepsilon = E_{\text{св}} / A = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}) \text{ МэВ.}$  (п. 1.9)
- Чем больше  $\varepsilon$ , тем устойчивее ядро.
- **Нейтрон, поглощенный ядром, увеличивает энергию на энергию связи**
- $\varepsilon_n = 931 [(m_{Z,A} + m_n) - m_{Z,A+1}] \text{ МэВ ,}$  (п. 1.10)
- где  $m_n$ ,  $m_{Z,A}$ ,  $m_{Z,A+1}$  — масса нейтрона и ядра до и после поглощения нейтрона, а. е. м.

- При делении тяжелого ядра нейтроном на два осколка происходит изменение массы на величину

- $$\Delta m_f = m_{\text{я}} + m_n - (m_1 + m_2 + \nu_f m_n), \quad (\text{п.1.11})$$

- где  $m_{\text{я}}$ ,  $m_n$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  — масса исходного ядра, нейтрона и ядер-осколков соответственно, а. е. м.;  $\nu_f$  — количество образовавшихся при делении свободных нейтронов. Соответственно энергия деления согласно (п.1.7)

- $$E_f = 931 \Delta m_f. \quad (\text{п.1.12})$$

- Поэтому при расчетах считают, что на один акт деления ядра  $^{235}\text{U}$  выделяется энергия 200 МэВ. Ядерная энергия в миллионы раз больше энергии химических реакций.

Энергия, освобождающаяся при делении одного ядра  
распределяется примерно следующим образом

Таблица 1.1

Составляющая энергии	Энергия	
	МэВ	%
Кинетическая энергия осколков деления:		
легкого ядра	98	48
тяжелого ядра	67	33
Энергия мгновенного $\gamma$ -излучения	7	3,5
Кинетическая энергия нейтронов деления	5	2,5
Энергия $\beta$ -излучения осколков и продук- тов их распада	9	4,5
Энергия $\gamma$ -излучения осколков и продук- тов их распада	7	3,5
Энергия антинейтрино	10	5
Полная энергия деления	~203	~100



- В настоящее время гелий синтезируют не из свободных нуклонов, а из изотопов водорода (дейтерия, трития), при этом на каждый нуклон выделяется энергия от 3,5 до 6 МэВ.
- При делении урана с учетом выхода различных осколков выделяется энергия примерно 200 МэВ на ядро, т. е. 0,85 МэВ на нуклон.
- Следовательно, в реакциях синтеза гелия может выделиться в 4—7 раз больше энергии, чем при делении такого же количества (по массе) изотопов урана.

- Реактивность характеризует реакцию активной зоны на изменения ее размножающих свойств, происходящих вследствие воздействия различных материальных и геометрических факторов (температуры, концентрации поглотителей нейтронов и т. п.).
- $K_{эф}$  определяется энергией нейтронов, осуществляющих деление ядер горючего, составом и свойствами компонентов активной зоны, размерами и формой размножающей среды.

- При делении ядер U и Pu рождаются нейтроны в широком диапазоне энергий: максимальное число нейтронов имеют энергию —0,7 МэВ; максимальная энергия нейтронов достигает—18 МэВ, средняя энергия —2 МэВ.

- В зависимости от энергии нейтроны относятся к одной из групп: 1) *сверхбыстрые* ( $E > 20 \text{ МэВ}$ ), 2) *быстрые* ( $0,2 \text{ МэВ} < E < 20 \text{ МэВ}$ ), 3) *промежуточные* ( $0,5 \text{ кэВ} < E < 0,2 \text{ МэВ}$ ), 4) *надтепловые* ( $0,1 \text{ эВ} < E < 0,5 \text{ кэВ}$ ), 5) *тепловые* ( $E < 0,1 \text{ эВ}$ ), 6) *холодные* ( $E < 5^{-3} \text{ эВ}$ ).
- ЯР, в которых преобладают нейтроны одной из трех групп (быстрые, промежуточные, тепловые), называют соответственно **реакторами на быстрых, промежуточных и тепловых нейтронах**.
- *Процесс уменьшения кинетической энергии нейтронов при их движении в среде называется замедлением.*



