

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: ${}_Z^AX$. 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:

$$R_{\text{я}} \approx 1,45 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м} \quad (\text{п.1.1})$$
- 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 $\sim 10^{-15} \text{ м}$), **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

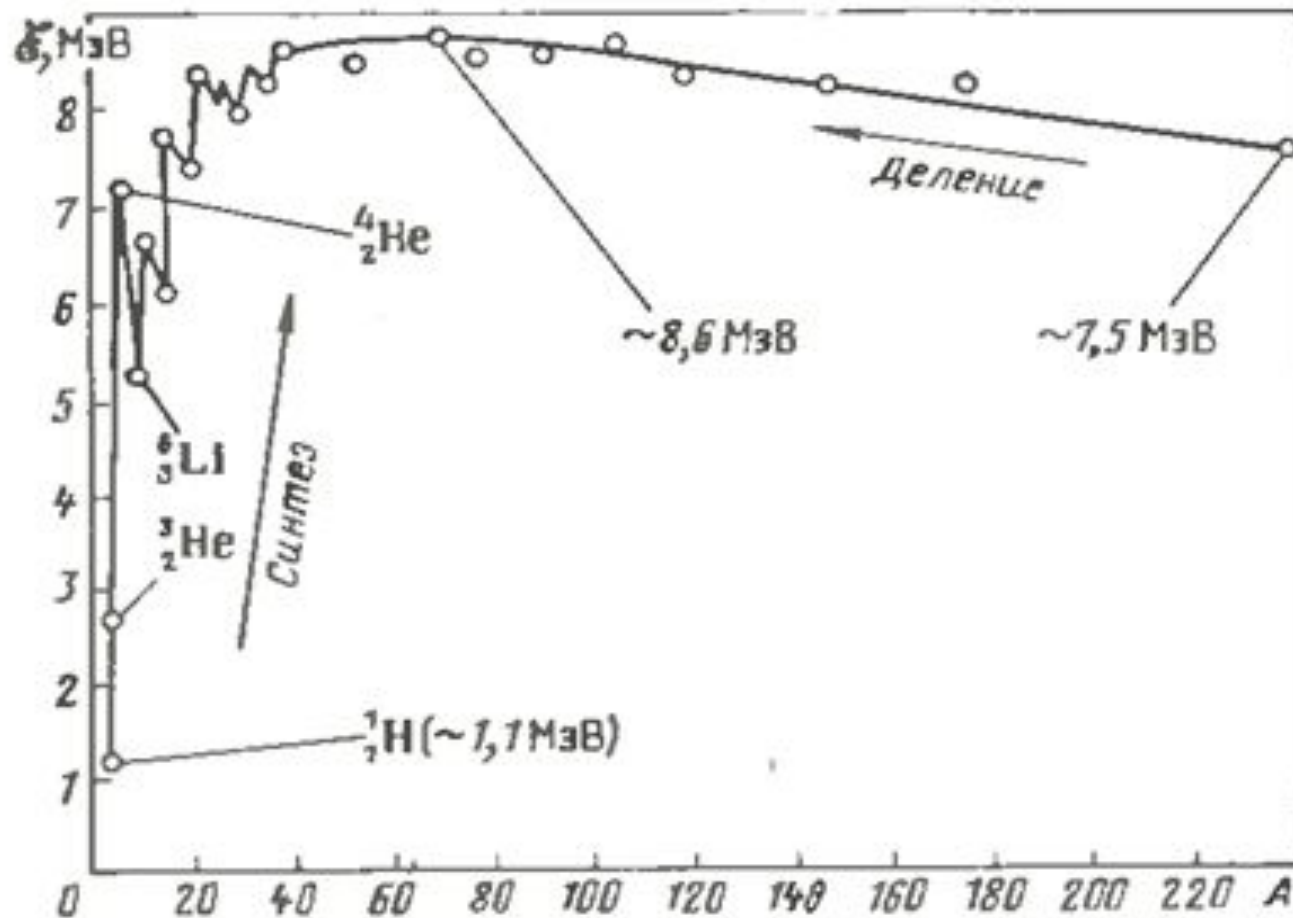
$$E = mc^2 = 1(3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10 \text{ кВт ч.}$$
- *Энергия, заключенная в 1 кг вещества, примерно равна теплоте сгорания $2,1 \cdot 10^6$ т нефти или $3 \cdot 10^6$ т угля.*

- 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
 $10^6 \text{ эВ} = 1 \text{ МэВ}$.
- Энергия массы, равной 1 а.е.м.:
 $E = mc^2 = 1,6605 \cdot 10^{-27} (3 \cdot 10^8)^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931 \text{ м МэВ}$.

- Разность между суммой масс частиц (нуклонов), составляющих ядро и массой ядра, называется избытком массы.
Так, избыток массы для ^{12}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 выделяться 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 ($E_{\text{св}}$) связи нуклона от массового числа.



2.1. Устойчивость ядер.

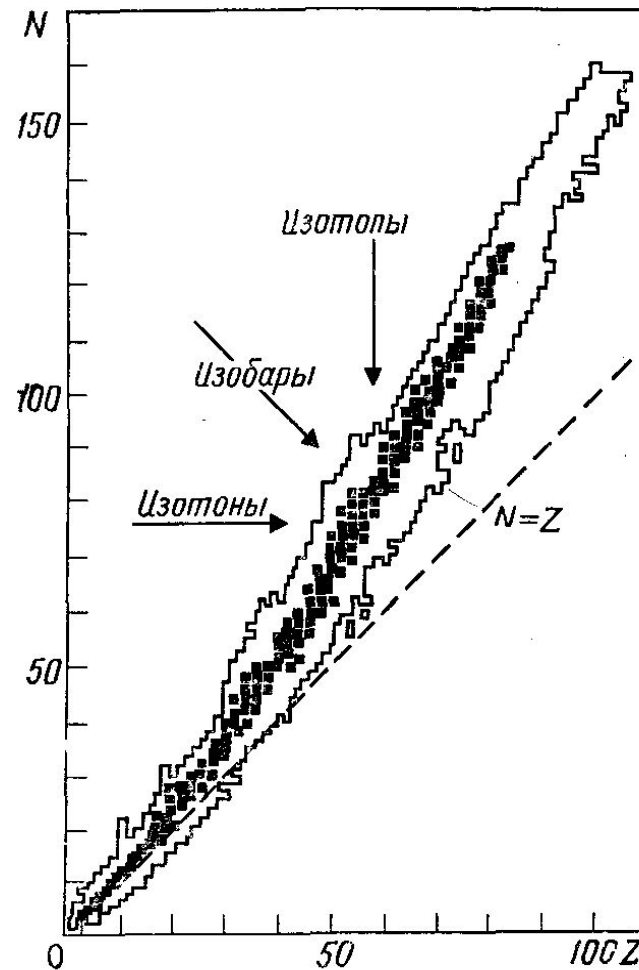
- Из факта убывания $E_{\text{св}}$ для нуклидов с массовыми числами больше или меньше 50-60 следует, что для ядер с малыми A энергетически выгоден процесс слияния - термоядерный синтез, приводящий к увеличению массового числа, а для ядер с большим A - процесс деления.
- В настоящее время оба эти процесса, 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 $E_{\text{св}}$.

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 $^{40}_{20}\text{Ca}$.
- 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 $^{208}_{82}\text{Pb}$

- Все нестабильные тяжелые нуклиды в результате α -распада переходят в стабильные нуклиды.
- 5. Выше дорожки стабильных ядер располагаются β^- -активные нуклиды, перегруженные нейтронами. Они в результате β^- -распадов опускаются по изобарным линиям, пока не перейдут в соответствующие стабильные нуклиды. Ниже области стабильных ядер находятся β^+ -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 Δm 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_{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 ε , 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
- $\Delta m_f = m_{\text{я}} + m_n - (m_1 + m_2 + \nu_f m_n)$, (п.1.11)
- где $m_{\text{я}}$, m_n , m_1 , m_2 — масса исходного ядра, нейтрона и ядер-осколков соответственно, а. е. м.; ν_f — количество образовавшихся при делении свободных нейтронов. Соответственно энергия деления согласно (п.1.7)
- $E_f = 931 \Delta m_f$. (п.1.12)
- Поэтому при расчетах считают, что **на один акт деления ядра ^{235}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 γ -излучения	7	3,5
Кинетическая энергия нейтронов деления	5	2,5
Энергия β -излучения осколков и продук-	9	4,5
тов их распада		
Энергия γ -излучения осколков и продук-	7	3,5
тов их распада		
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 выделяться 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.**

