

## Лекция 11

### «Характеристики атомных ядер»

1. Общие характеристики ядер
2. Статические характеристики ядер
3. Масса покоя ядра и энергетический спектр ядер
4. Спин и магнитный момент ядра
5. Заряд ядра и квадрупольный момент
6. Методы измерения масс ядер
7. Масс – спектроскопия
8. Массовое число
9. Энергия связи
10. Энергия отделения фрагмента ядра
11. Удельная энергия связи

## Общие характеристики ядер

Атомное ядро состоит из  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов, которые вместе составляют массовое число  $A=Z+N$ . Соотношение  $Z/N \approx 1$  для легких и средних ядер ( ${}^{16}_8\text{O}$ ). В тяжелых ядрах число нейтронов в 1,5 раза превосходит количество протонов ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ).

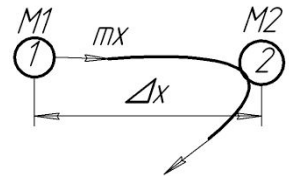
Ядро удерживается от распада за счет ядерных сил притяжения. Аналогично, силы притяжения действуют на протоны и нейтроны. Переносчиком этих сил являются кванты сильного взаимодействия – пионы. Виртуальные пионы существуют в виде «шубы», окружающей отдельные протоны и нейтроны  $p^+ \rightarrow n + \pi^+, n \rightarrow p^+ + \pi^-$

Пионы могут удалаться на расстояние  $\sim 1\phi$ , образуя короткодействующее поле ядерных сил.

Энергия связи нуклонов порядка 8 МэВ и значительно превосходит кулоновское отталкивание, прочно удерживая нуклоны в ядре.

Идентичность протонов и нейтронов относительно ядерного (сильного) взаимодействия подчеркивается их обобщением в качестве однотипных частиц-нуклонов

$$p \equiv n \equiv N$$



$$\Delta x = \frac{\hbar c}{m_x c^2}$$

## Общие характеристики ядер

Ядро (радиус  $R_{\text{я}} \leq 10^{-12}$  см) в атомном масштабе ( $R_{\text{ат}} \leq 10^{-8}$  см) занимает ничтожно малый объем  $\sim 10^{-10}$  %, однако его прочность значительно больше чем атома, поскольку  $\varepsilon_{\text{св}}$  нуклонов превосходит на несколько

порядков потенциал ионизации / атомов  $\frac{\varepsilon_{\text{св}}}{\text{эВ}} \geq \frac{8\text{МэВ}}{100} \approx \frac{10^7}{10^2} \approx 10^5$  .

Ядро (часто) можно рассматривать как точечную структуру с определенными характеристиками.

Ядра обозначают в виде  ${}^A_Z \text{Эл}$  например: гелий  ${}^4_2 \text{He}$ , кислород  ${}^{16}_8 \text{O}$

Среди ядер выделяют:

-изотопы - ядра с одинаковым числом протонов ( $Z = \text{const}$ ):  ${}^3_2 \text{He}, {}^4_2 \text{He}, {}^5_2 \text{He}$

-изобары – ядра с одинаковым числом нуклонов ( $A = \text{const}$ ):  ${}^{15}_7 \text{N}, {}^{15}_8 \text{O}$

-изотоны – ядра с одинаковым числом нейтронов ( $N = \text{const}$ ):  ${}^{13}_6 \text{C}, {}^{14}_7 \text{N}, {}^{15}_8 \text{O}$

По времени жизни (относительно распада) все ядра делят на две большие группы:

-стабильные – их время жизни стремится к бесконечности;

-радиоактивные ядра (испускание  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $p$ , деление и др.).

## Статические характеристики ядер

Характерное ядерное время составляет величину порядка  $10^{-23}$  сек. Это фактически время пролета одного релятивистского нуклона мимо другого нуклона на близком расстоянии

$$\tau_{\text{яд}} \approx \Delta x / V : 2 \cdot 10^{-13} \text{ см} \text{ (} 3 \cdot 10^{10} \text{ сек} \text{)} : 10^{-23}$$

где  $\Delta x$  – размер нуклона; для оценки взято:  $V \approx c$ .

За такое время осуществляется ядерное взаимодействие между частицами, которое приводит к превращению и распаду ядерно-активных микрообъектов (в масштабе ядер, частиц, нуклонов, кварков).

Ядро сложная квантово-механическую система многих тел с сильной связью между нуклонами. Нет единой теории для описания всех характеристик ядер. Многие параметры получены в рамках модельных представлений и эмпирическим путем.

## Масса покоя ядра и энергетический спектр

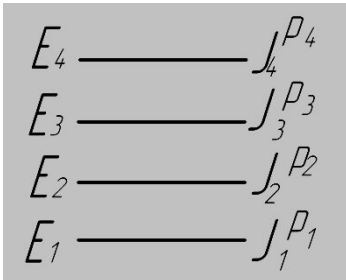
Масса ядра определяется как

$$Mc^2 = \sum_1^Z m_p c^2 + \sum_{A-Z} m_n c^2 - E_{св}$$

$E_{св}$  - энергия связи ядра.

Масса ядра меньше суммы масс нуклонов на энергию связи, которая составляет малую величину массы от  $Mc^2$  ( $E_{св} \leq 1\% Mc^2$ ).

При поглощении энергии  $\Delta E$  масса ядра возрастает  $(Mc^2)^* = Mc^2 + \Delta E$



Энергетический спектр уровней ядра имеет дискретный набор значений  $E_i$ , с временами жизни  $\tau_i$  и шириной линий возбуждения  $\Gamma_i$ , спинами отдельных уровней  $J_i$  и их четностью ( $P = \pm 1$ ).

Ядро в целом также характеризуется полным моментом (который называют спином ядра) и четностью состояния  $J^P$ , например,  $J^P = (3/2)^+$

## Спин и магнитный момент ядра

Спин ядра это полный момент всех нуклонов  $\vec{J} = \sum (\vec{L}_N + \vec{S}_N)$

Как правило, происходит взаимная компенсация моментов отдельных нуклонов, например  $J(^{60}\text{Co})=5$ . Если бы не было

компенсации, то  $J^{\min} \approx (1/2) \cdot 60 \approx 30$

минимальное значение спина за счет нуклонов было бы  $J^{\min} \approx \frac{1}{2} \cdot A$   
Для большинства ядер  $0 \leq J \leq (1/2)$

Магнитный момент ядра является суммой магнитных моментов отдельных нуклонов. Происходит компенсация моментов, подобно эффекту при сложении спинов нуклонов. Задача усложняется существованием аномальных моментов у отдельных протонов и

нейтронов:

где  $\mu_B$  ядерный магнетон для точечного протона.  $\mu_p = \frac{e_p \cdot \hbar}{m_p \cdot c} = \mu_B$   
 $\mu_B^{\text{экс}} = (1 + 1,79)\mu_B$      $\mu_n^{\text{экс}} = (0 - 1,81)\mu_B$

Магнитные моменты, как правило, получаются экспериментально на основе измерения дополнительной энергии

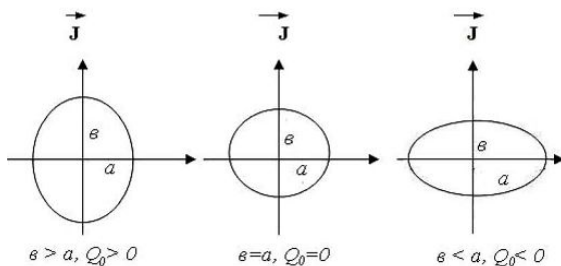
возникающей у ядра при его помещении в магнитное поле  $\Delta E = \vec{\mu} \cdot \vec{H}$

# Заряд ядра и квадрупольный момент

Заряд ядра определяется полным числом протонов входящих в состав ядра ( $Z$ ). Дробные заряды кварков (например, протон состоит из

трех кварков с зарядами  $\frac{+2e}{3}, \frac{+2e}{3}, \frac{-1e}{3}$  проявляется на расстояниях  $\Delta x < 10^{-13}$  см при изучении внутренней структуры отдельных нуклонов.

Квадрупольный момент ядра  $\vec{Q}$  характеризует отклонение формы ядра от сферичности. Для определенного набора ядер (магические ядра) квадрупольные моменты равны нулю.



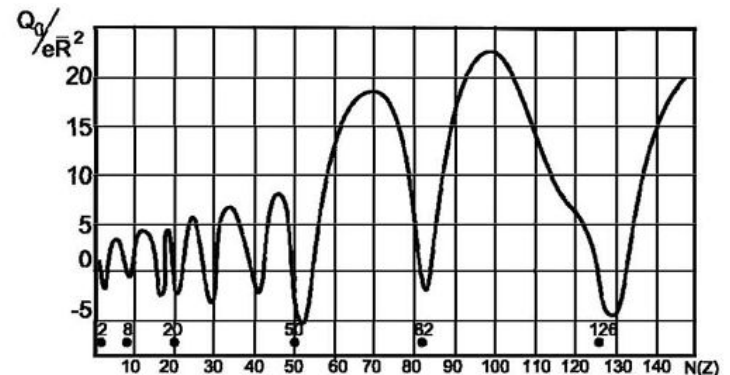
Для большинства ядер значения  $Q > 0$ , при этом степень несферичности  $\frac{Q}{4\pi R^2}$  более нескольких процентов.

Определение величины  $\vec{Q}$  основывается на измерении дополнительной энергии  $\Delta E$

ядра при его помещении в неоднородное (по оси  $Z$ ) электрическое

поле  $\vec{\mathcal{E}}$  :

$$\Delta E = \vec{Q} \cdot \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Z}$$



## Методы измерения масс ядер

Единица измерения масс - 1/12 часть массы атома углерода  $^{12}_6\text{C}$

1 ат. ед. массы  $\frac{1}{12} M_{\text{ат}}(^{12}_6\text{C}) = \frac{1}{12} \left( \frac{A}{N_{\text{ав}}} \right) = 1,660 \cdot 10^{-24}$  системе CGSE

$$\text{а.е.Е} \approx 1,6 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \left( 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}} \right)^2 \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ эрг} = 931,5 \text{ МэВ}$$

1 а.е.Е (931 МэВ) меньше массы протона или нейтрона ( $mc^2 = 938 \text{ МэВ}$ )

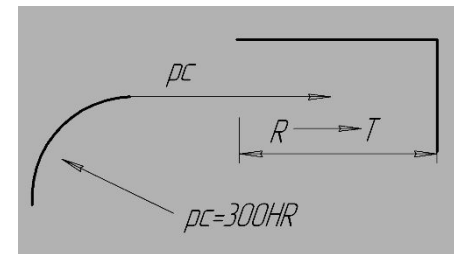
Методы измерения масс ядер:

Баланс ядерной реакции:  $1 + 2 \rightarrow 3 + 4$

Сохранение полной энергии  $m_1c^2 + m_2c^2 + T_1 = m_3c^2 + m_4c^2 + T_3 + T_4$

Прямое измерение массы отдельной заряженной частиц

Частица с известным импульсом  $pc$  попадает в детектор-поглотитель, где происходит ее остановка. По пробегу  $R$



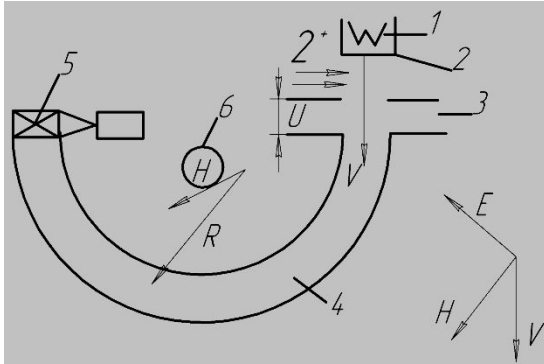
восстанавливается энергия  $T$ .  
Масса находится из формулы

$$T = \frac{p^2}{2m} = \frac{(pc)^2}{2mc^2}$$



# Масс – спектроскопия

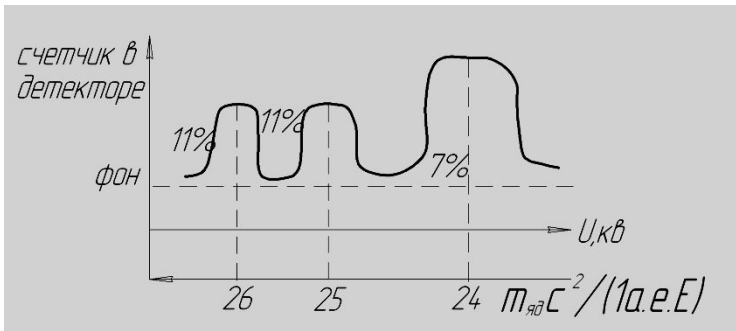
В масс-спектрометре измеряется масса иона  $M_{\text{ион}} c^2$ , ускоренного до определенной энергии.



Нагреватель (1), образец (2), массу атомов которого надо определить. Положительный ион  $Z$  попадает в ускоряющий промежуток (3) с напряжением  $U$ . Ион с импульсом  $pc$  движется в вакуумной камере в поперечном магнитном поле. Выполнение условия  $F_{\text{Лор}} = F_{\text{цен}}$  приводит к соотношению  $pc = Z \cdot 300HR$ .

Ион попадает в счетчик (5), где проводится регистрация интенсивности счета в зависимости от  $U$ . Для вычисления массы иона, получаем выражение

$$Mc_{\text{ион}}^2 = \frac{zeH^2 R^2}{2U}$$



$$(Mc^2)_{\text{ион}}^+ = M_{\text{я}}^2 + \sum m_e c^2 - \sum E_{\text{св}}$$

Отношение площадей под пиками

$$^{26}\text{Mg} : ^{25}\text{Mg} : ^{24}\text{Mg} = 11\% : 11\% : 78\%$$

Расчетные формулы

$$pc = ZeHR; \quad T_{\text{ион}} = ZeU; \quad T_{\text{ион}} = (pc)^2 / 2M_{\text{ион}} c^2$$

## Массовое число

элемент	${}^1_1H$	${}^7_3Li$	${}^{12}_6C$	${}^{16}_8O$
$Mc^2/1a.e.E. \times 10^{-7}$	1,0078252	7,01600039	12	15,99491502
<b>А-массовое число</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>16</b>

Массовое число **A**  
достаточно  
хорошо отражает  
массу атомов

## Энергия связи

Разность между суммой масс отдельных нуклонов ядра и его массой как целого в энергетических единицах составляет энергию связи

$$E_{св} = \sum m_p c^2 + \sum m_n c^2 - M(A, Z)c^2 = Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - M(A, Z)c^2$$

Энергия связи **Есв > 0** определяет энергию, которую **надо сообщить ядру**, чтобы его разделить на отдельные составляющие нуклоны. Если **Есв < 0**, то ядро неустойчиво по отношению к распаду.  $E_{св} \approx 1\%$

Энергия связи относительно отдельного фрагмента ядра, например для отделения  $\alpha$ -частицы

$$E_{св}^{\alpha} = M_{\alpha} c^2 + M(A - 4, Z - 2)c^2 - M(A, Z)c^2$$

## Энергия отделения фрагмента ядра

В общем виде энергия связи (отделение фрагмента ядра) определяется как сумма масс конечных продуктов минус масса начального ядра. Например, энергия связи  $n$  внутри ядра  ${}^{236}_{92}\text{U}$  получается из выражения

$$E_{cb}^n = [m_n + M({}^{235}_{92}\text{U}) - M({}^{236}_{92}\text{U})] \cdot c^2$$

Массы всех составляющих известны:  $m_n \approx 1.00866$  а.е.м.,  $M(U_{236}) = 236.04573$ ,  $M(U_{235}) = 235.04393$ . В результате получим

$$E_{cb}^n \approx 0.00073 \times 1 \text{ МэВ} \cdot c^2 \approx +6.8$$

Это означает:

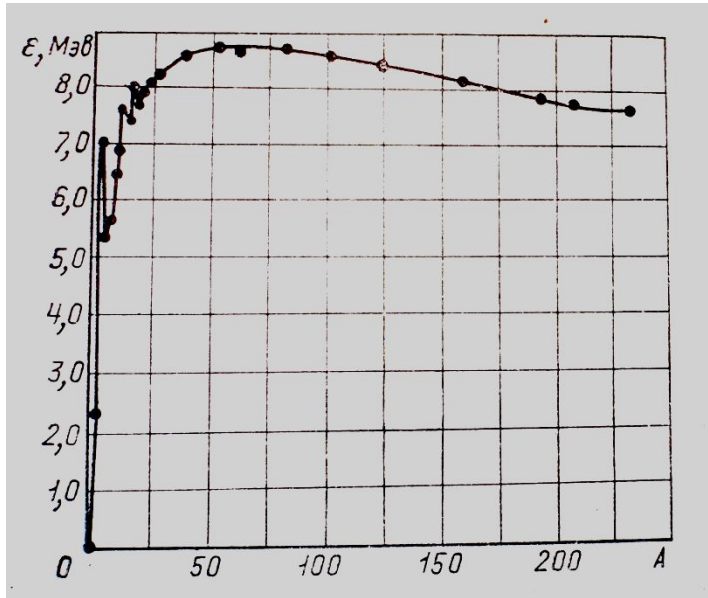
- на отделение нейтрона из ядра  ${}^{236}_{92}\text{U}$  необходимо затратить энергию 6,8 МэВ.

- при поглощении теплового нейтрона ( $T_n \approx 0$ ) ядром, образовавшееся новое ядро  ${}^{236}_{92}\text{U}$ , получает возбуждение 6.8 МэВ за счет выделения

энергии связи в реакции  $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow ({}^{236}\text{U})^*$

## Удельная энергия связи

Для сопоставления энергетической «прочности» разных ядер вводится понятие средней удельной энергии связи на один нуклон ядра  $\varepsilon = E_{\text{св}} / A$



Из графика зависимости  $\varepsilon$  от массового числа  $A$  видно, что среднее значение  $\varepsilon \approx 8$  МэВ/нуклон для большинства ядер.

При небольших значениях  $A$  величина  $\varepsilon$  постепенно возрастает и уже при  $A \sim 9$  (Be) достигает значения 6,4 МэВ.

Для больших значений  $A$  ( $\geq 100$ ) начинается спад величины  $\varepsilon$  за счет возрастания роли кулоновских сил отталкивания ( $\sim Z^2$ ), которые ослабляют прочность ядра.

Для вычисления энергии связи требуются данные о массах ядер с достаточно высокой точностью.

Из формы зависимости  $\varepsilon(A)$  следует, что тяжелым ядрам ( $A \geq 200$ ) энергетически выгодно делиться на два приблизительно равных осколка. В этом случае у конечных ядер удельная энергия связи больше, чем у начального ядра.