Лекция 11

«Характеристики атомных ядер»

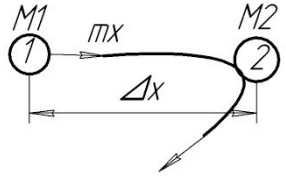
1. Общие характеристики ядер
2. Статические характеристики ядер
3. Масса покоя ядра и энергетический спектр ядер
4. Спин и магнитный момент ядра
5. Заряд ядра и квадрупольный момент
6. Методы измерения масс ядер
7. Масс – спектроскопия
8. Массовое число
9. Энергия связи
10. Энергия отделения фрагмента 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* ≈ 1 для легких и средних ядер (${}^{16}_{8}O$) . В тяжелых ядрах число нейтронов в 1,5 раза превосходит количество протонов (${}^{238}_{92}U$).

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 $p^+ \to n + \pi^+, n \to p^+ + \pi^-$

Пионы могут удаляться на расстояние ~1ф, образуя короткодействующее поле ядерных сил.



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

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

$$p \equiv n \equiv N$$

Общие характеристики ядер

Ядро (радиус $R_я \le 10^{-12}$ см) в атомном масштабе ($R_{ат} \le 10^{-8}$ см) занимает ничтожно малый объем ~ 10^{-10} %, однако его прочность значительно больше чем атома, поскольку $\varepsilon_{св}$ нуклонов превосходит на несколько порядков потенциал ионизации *I* атомов $\frac{\varepsilon_{св}}{I_B} \ge \frac{8 МэВ}{100} \approx \frac{10^7}{10^2} \approx 10^5$.

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

Ядра обозначают в виде ${}^{A}_{Z}Эл$ например: гелий ${}^{4}_{2}He$, кислород ${}^{16}_{8}O$

Среди ядер выделяют:

-изотопы - ядра с одинаковым числом протонов (Z = const): ${}^{3}_{2}He, {}^{4}_{2}He, {}^{5}_{2}He$

-изобары – ядра с одинаковым числом нуклонов (A = const): ${}^{15}_{7}N, {}^{15}_{8}O$

-изотоны – ядра с одинаковым числом нейтронов (N = const): ${}^{13}_{6}C, {}^{14}_{7}N, {}^{15}_{8}O$

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

-стабильные – их время жизни стремиться к бесконечности;

-радиоактивные ядра (испускание γ, α, 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

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

где Δx – размер нуклона; для оценки взято: V ≈ 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.

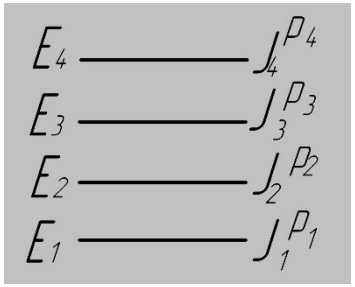
Масса покоя ядра и энергетический спектр

Масса ядра определяется как

$$Mc^2 = \sum_{1}^{Z} m_p c^2 + \sum_{A-Z}^{A} m_n c^2 - E_{св}$$

$E_{св}$ - энергия связи ядра.

Масса ядра меньше суммы масс нуклонов на энергию связи, которая составляет малую величину массы от Mc^2 ($Eсв \leq 1\ \%\ Mc^2$). При поглощении энергии ΔE масса ядра возрастает $(Mc^2)^* = Mc^2 + \Delta E$



Энергетический спектр уровней ядра имеет дискретный набор значений E_i, с временами жизни τ_i и шириной линий возбуждения Γ_i, спинами отдельных уровней J_i и их четностью (P=+/-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}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 $0 \le J \le (11/2)$

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

$\mu_{Б}^{экс} = (1+1,79)\mu \quad \mu_n^{экс} = (0-1,81)\mu_Б$

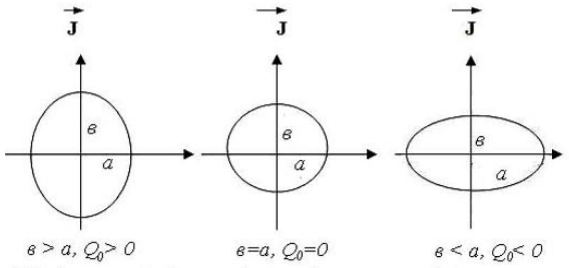
где $\mu_Б$ ядерный магнетон для точечного протона. $\mu_p = \frac{e_p \cdot \hbar}{m_p \cdot c} = \mu_Б$

Магнитные моменты, как правило, получаются экспериментально на основе измерения дополнительной энергии возникающей у ядра при его помещении в магнитное поле $\Delta E = \vec{\mu} \cdot \vec{H}$ $\vec{H}$

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.

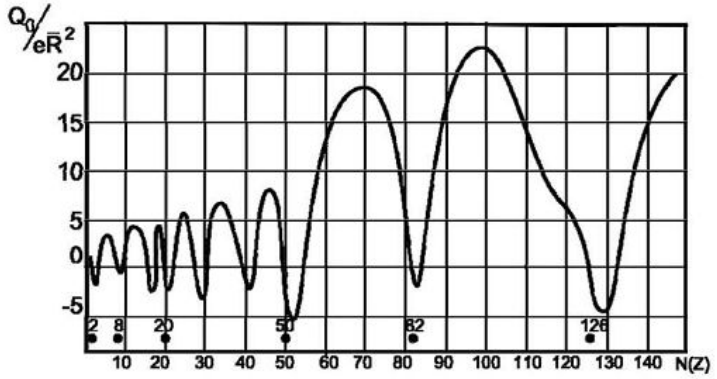
Квадрупольный момент ядра $\vec{Q}$ характеризует отклонение формы ядра от сферичности. Для определенного набора ядер (магические ядра) квадрупольные моменты равны нулю.



Для большинства ядер значения Q > 0, при этом степень несферичности ядра $\delta R / R$ не более нескольких процентов.

Определение величины $\vec{Q}$ основывается на измерении дополнительной энергии ΔE ядра при его помещении в неоднородное (по оси Z) электрическое поле $\vec{\varepsilon}$:

$$\Delta E = \vec{Q}\frac{\overrightarrow{\partial \varepsilon}}{\overrightarrow{\partial Z}}$$



Методы измерения масс ядер

Единица измерения масс - 1/12 часть массы атома углерода $^{12}_{6}C$

1 ат. ед.массы $\frac{1}{12}M_{am}\left(^{12}_{6}\right) = \frac{1}{12}\left(\frac{A}{N_{ав}}\right) = 1,660 \cdot 10^{-24}$ г системе *CGSE*

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

1 а.е.Е (931 *МэВ*) меньше массы протона или нейтрона (***mc² = 938 МэВ***)

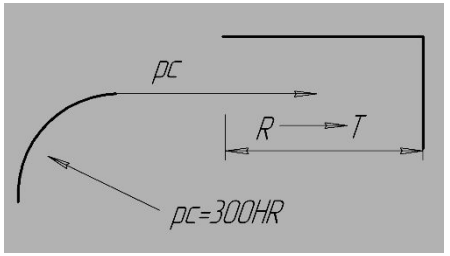
Методы измерения масс ядер:

Баланс ядерной реакции: 1 + 2 → 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

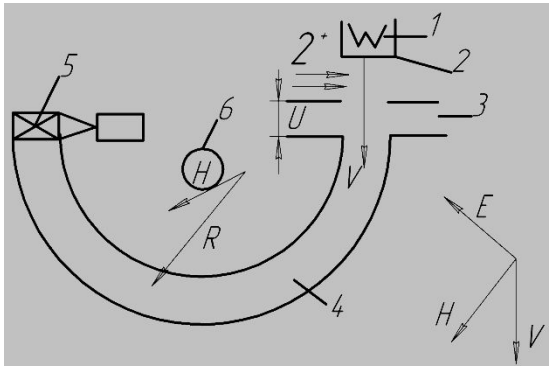
Частица с известным импульсом pc попадает в детектор-поглотитель, где происходит ее остановка. По пробегу *R*



восстанавливается энергия *T* .
Масса находится из формулы $T = \frac{p^2}{2m} = \frac{(pc)^2}{2mc^2}$

Масс – спектроскопия

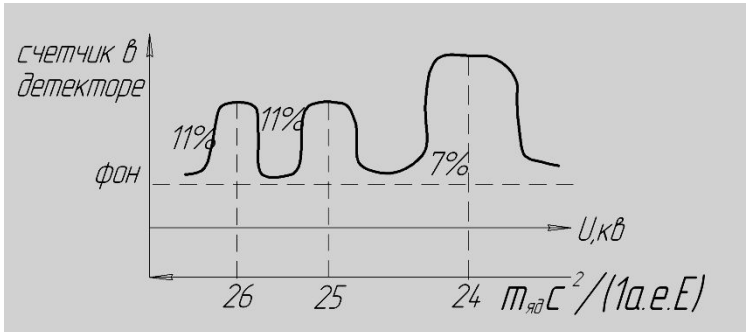
В масс-спектрометре измеряется масса иона $M_{ион}c^2$, ускоренного до определенной энергии.



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 $F_{Лор} = F_{цен}$ приводит к соотношению *pc= Z*300HR*.

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

$$Mc^2_{ион} = \frac{zeH^2R^2}{2U}$$



$$(Mc^2)^+_{ион} = M_я{}^2 + \Sigma m_e c^2 - \Sigma E_{св}$$

Отношение площадей под пиками

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

Расчетные формулы

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

Массовое число

элемент	$^{1}_{1}H$	$^{7}_{3}Li$	$^{12}_{6}C$	$^{16}_{8}O$
$Mc^2/1a.e.E.\times10^{-7}$	1,0078252	7,01600039	12	15,99491502
A-массовое число	**1**	**7**	**12**	**16**

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

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

Энергия связи Eсв > 0 определяет энергию, которую надо сообщить ядру, чтобы его разделить на отдельные составляющие нуклоны. Если Eсв < 0 , то ядро неустойчиво по отношению к распаду. Eсв ≈ 1%

Энергия связи относительно отдельного фрагмента ядра, например для отделения α-частицы

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

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 $^{236}_{92}U$ получается из выражения

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

Массы всех составляющих известны: *m_n≈1.00866 a.e.m., $M(U_{236})$=236.04573, $M(U_{235})$=235.04393.* В результате получим

$$E^{n}_{св} = 0.0073 \times 1 \ МэВ \cdot \ ^2 \approx +6.8$$

Это означает:

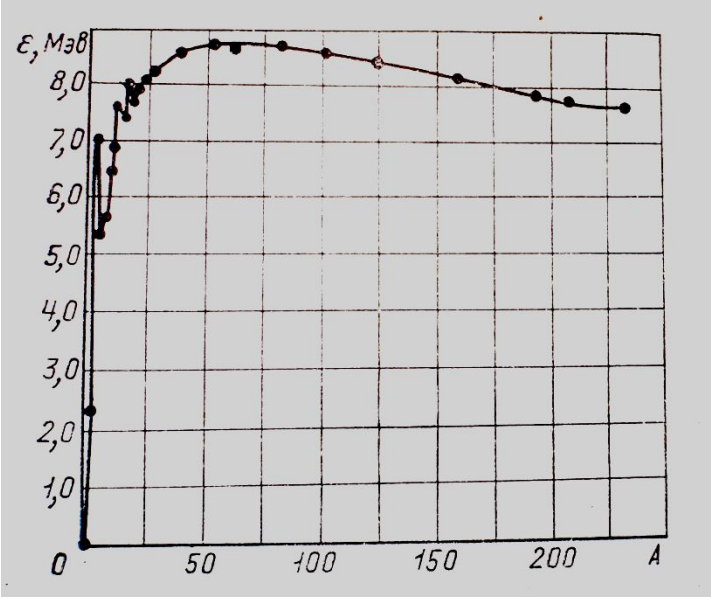
- на отделение нейтрона из ядра $^{236}_{92}U$ необходимо затратить энергию 6,8 МэВ.

-при поглощении теплового нейтрона (T_n≈0) ядром , образовавшееся новое ядро $^{236}_{92}U$, получает возбуждение 6.8 МэВ за счет выделения энергии связи в реакции

$$n + ^{235}U \rightarrow (^{236}U)^*$$

Удельная энергия связи

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



Из графика зависимости ε от массового числа А видно, что среднее значение ε ≈ 8 МэВ/нуклон для большинства ядер.

При небольших значениях А величина ε постепенно возрастает и уже при А ~ 9 (Be) достигает значения 6,4 МэВ.

Для больших значений А (≥100) начинается спад величины ε за счет возрастания роли кулоновских сил отталкивания (~Z^2), которые ослабляют прочность ядра.

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

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