

Лекція №8. Ядерна фізика. Розмір і склад ядра. Дефект маси та енергія зв'язку

VII. Ядерна фізика **Розмір, склад і заряд ядра.** **Масове і зарядове число**

Резерфорд, досліджуючи проходження α -частинок з енергією декілька МеВ крізь тонкі пластинки золота, дійшов висновку про те, що атом складається з позитивно зарядженого ядра і електронів, які його оточують. Розмір ядра $\sim 10^{-14} - 10^{-15}$ м (розмір атома $\sim 10^{-10}$ м).

Атомне ядро складається з елементарних частинок-протонів і нейтронів. Протон (p) має позитивний заряд, що дорівнює заряду електрона, і масу спокою $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг = 1836 m_e . Нейтрон (n) – нейтральна частинка з масою спокою $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг = 1839 m_e . Протони і нейтрони називають нуклонами (від латинського nucleus – ядро).

Загальна кількість нуклонів в ядрі називається масовим числом A. До складу ядра входять Z протонів та N нейтронів, тому $A = Z + N$. Ядро позначають тим самим символом, що і атом ${}_Z^AX$, де X – символ хімічного елемента.

Атомні ядра, що відрізняються кількістю протонів Z і нейтронів N, називаються нуклідами. Атомне ядро характеризується зарядом Ze, де e – заряд протона, Z – зарядове число ядра, яке дорівнює кількості протонів у ядрі і збігається з порядковим номером в періодичній системі Менделєєва. Враховуючи той факт, що атом нейтральний, стає очевидним, що заряд ядра визначає і кількість електронів у атомі.

Ядра з однаковим Z, але різними A (різна кількість нейтронів) називаються ізотопами, а ядра з однаковим A, але різними Z називаються ізобарами. Наприклад, водень (Z=1), має три ізотопи ${}_1^1\text{H}$ – протій (Z=1; N=0), ${}_1^2\text{H}$ – дейтерій (Z=1; N=1), ${}_1^3\text{H}$ – тритій (Z=1; N=2), олово – 10 ізоотопів і т. д. Здебільшого ізоотопи одного і того самого елемента мають однакові хімічні і фізичні властивості (виняток - ізоотопи водню). Це пояснюється тим, що фізичні та хімічні властивості визначаються, переважно, електронною будовою атома, тобто структурою електронних оболонок, яка для всіх ізоотопів є однаковою. Прикладом ядер-ізобар можуть бути ядра ${}_{17}^{108}\text{Ag}, {}_{48}^{108}\text{Cd}; {}_4^{10}\text{Be}, {}_5^{10}\text{B}, {}_6^{10}\text{C}$.

Ядра з однаковою кількістю нейтронів $N = A - Z$ називаються ізотонами. Існують радіоактивні ядра з однаковим Z і A, які відрізняються за періодом піврозпаду. Вони називаються ізомерами. Прикладом ядер ізотонів є ${}_{20}^{44}\text{Ca}$ і ${}_{22}^{46}\text{Ti}$. Радіус ядра визначається емпіричною формулою:

$$R = R_0 A^{1/3}, \text{ де } R_0 = (1,3 : 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Радіус ядра, враховуючи його розмитість, визначається в певних межах. З формули видно, що радіус пропорційний до кількості нуклонів. Отже, густина ядерної речовини є приблизно однакова для всіх ядер ($\sim 10^{17}$ кг/м³). Маса атомів і

ядер в ядерній фізиці виражають в атомних одиницях маси (а.о.м.). За атомну одиницю маси приймається $1/12$ частина маси атома вуглецю ^{12}C .

$$1\text{ а.о.м.} = \frac{1}{12} \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}}{N_A} = 1,66 \cdot 10^{-27}$$

Згідно із співвідношенням Ейнштейна $E=mc^2$ масу атомів визначають також в одиницях енергії:

$$1\text{ а.о.м.} = 931,50 \text{ Мев}$$

92. Дефект маси і енергія зв'язку ядра

Атомні ядра є стійкими утвореннями. Це означає, що в ядрі між нуклонами існують сили притягання, які забезпечують зв'язки між нуклонами.

Мас-спектрометричні дослідження показали, що маса ядра менша, ніж сума мас нуклонів, з яких воно складається.

Зменшення маси нуклонів викликане переходом їх із вільного стану у зв'язаний стан в атомному ядрі. Виникнення зв'язаного стану нуклонів відбувається під дією ядерних сил притягання. Як тільки нуклони виявляються в області дії ядерних сил, вони швидко починають зближатися і набувають великої кінетичної енергії. При переході нуклонів у зв'язаний стан (утворення ядра) вони потрапляють в потенціальну яму з мінімальними для даного ядра значеннями енергії спокою E_0 .

Отримана раніше нуклонами кінетична енергія виділяється у вигляді γ -квантів або переходить до інших частинок.

Енергію $E_{\text{зв}}$, яка виділяється при утворенні ядра, називають енергією зв'язку ядра.

Із закону збереження енергії випливає і зворотний висновок: для розділення ядра необхідно затратити таку саму кількість енергії, яка виділяється при його утворенні.

Зменшення енергії спокою нуклонів при переході їх у зв'язаний стан (утворення ядра) і виділення її у вигляді енергії зв'язку $E_{\text{зв}}$ супроводжується відповідно до закону Ейнштейна $\Delta E = \Delta mc^2$ зменшенням сумарної маси спокою нуклонів. Це приводить до дефекту маси ядра, що дорівнює різниці між масою нуклонів, які утворюють ядро, і масою ядра.

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}},$$

де $m_p, m_n, m_{\text{я}}$ – маси протона, нейтрона, ядра, відповідно.

Оскільки в таблицях наводять масу атомів, а не ядер, то Δm виражають через масу атома:

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_{\text{ам}},$$

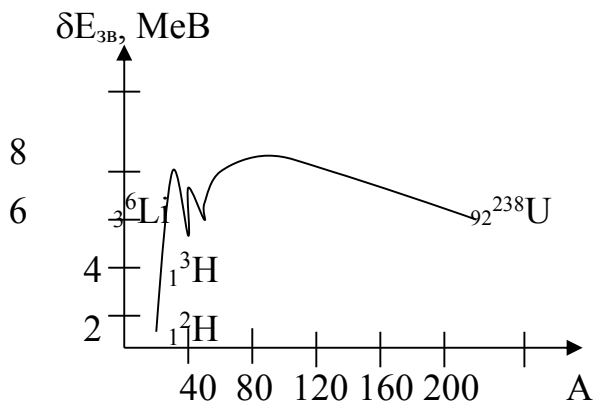
де $m_H = m_p + m_e$, $m_{\text{ам}} = m_{\text{я}} + Zm_e$, m_H – маса атома водню, m_e – маса електрона.

Отже, стійкість ядра як сукупність нуклонів у зв'язаному стані, підтримується відносним зменшенням енергії системи на

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2.$$

Дефект маси є мірою енергії зв'язку ядра.

Переважно розглядають і використовують питому енергію зв'язку – енергію зв'язку $\delta E_{\text{зв}}$, що припадає на один нуклон. Питома енергія зв'язку залежить від масового числа і характеризує стійкість атомних ядер. Чим більша питома енергія зв'язку, тим стійкіше атомне ядро. Залежність питомої енергії зв'язку від масового числа наведена на рис. 193.



В області невеликих масових чисел питома енергія зв'язку виявляє характерні гострі “піки” – максимуми і мінімуми. Мінімуми для енергії зв'язку на один нуклон спостерігаються в області ядер з непарними кількостями протонів і нейтронів – ${}^3_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$. Максимуми питомої енергії зв'язку відповідають ядрам з парними числами протонів і нейтронів (${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$). Найбільші значення питомої енергії зв'язку мають парно-парні ядра, тобто ядра з парною кількістю протонів Z і парною кількістю нейтронів $N = A - Z$. Найменшу енергію зв'язку на один нуклон мають непарно-непарні ядра. Проміжні значення питомої енергії зв'язку мають парно-непарні і непарно-парні ядра.

Питома енергія зв'язку $\delta E_{\text{зв}}$ різко зростає для легких елементів від 1 MeV до $\sim 6\text{--}7\text{ MeV}$ (з різкими стрибками для деяких елементів), потім повільно збільшується до 8,7 MeV (елементи з $A = 50\text{--}60$) і повільно зменшується (до 7,6 MeV у ${}^{238}_{92}\text{U}$) для важких елементів.

Ядра елементів в середній частині таблиці Менделєєва ($28 < A < 138$) від ${}^{28}_{14}\text{Si}$ до ${}^{138}_{56}\text{Ba}$ найбільш стійкі, в цих ядрах $\delta E_{\text{зв}} \sim 8,7\text{ MeV/нуклон}$. Найстійкішими виявились так звані “магічні ядра”, у яких кількість протонів або нейтронів дорівнює одному з “магічних чисел”: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Отже, важкі і легкі ядра менш стійкі. Це означає, що енергетично вигідні такі процеси:

- 1) поділ важких ядер на більш легкі;
- 2) злиття легких ядер у важчі (синтез).

Під час обох процесів виділяється величезна кількість енергії. Ці процеси здійснені практично.

93. Взаємодія нуклонів і поняття про властивості і природу ядерних сил

До складу атомного ядра входить Z протонів і $A - Z$ нейтронів. Незважаючи на те, що між протонами діють сили кулонівського відштовхування, атомні ядра є досить стійкими системами. Це вказує на те, що в ядрах атомів діють специфічні

сили притягання, які називають ядерними силами. Ядерні сили не можуть бути зведені ні до кулонівських, ні до молекулярних, ні до магнітних, ні до гравітаційних сил.

Основні властивості ядерних сил:

1. Ядерні сили є силами притягання.
2. Ядерні сили досить значні, тому таку взаємодію називають сильною. Енергія зв'язку, що припадає на один нуклон у ядрі, досягає 7 – 8,5 МеВ.
3. Ядерні сили є короткодійними на відміну від електромагнітних і гравітаційних сил. Радіус дії ядерних сил приблизно дорівнює розміру нуклона (10^{-15}м). При $r > 10^{-14}\text{м}$ ядерні сили практично дорівнюють нулю.
4. Ядерні сили мають властивість зарядової незалежності, тобто величина ядерних сил не залежить від електричного заряду взаємодіючих нуклонів. Ядерні взаємодії між двома протонами або між двома нейтронами, або між протоном і нейтроном однакові.
5. Ядерні сили мають властивість насичення, тобто кожен нуклон в ядрі взаємодіє лише з обмеженою кількістю найближчих до нього нуклонів. Насичення проявляється в тому, що питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі при збільшенні кількості нуклонів не зростає, а залишається приблизно постійною (якщо не враховувати легкі ядра).
6. Ядерні сили залежать від орієнтації спінів нуклонів, які взаємодіють. Система з протона і нейтрона утворює ядро-дейтрон лише у випадку, коли спіни протона і нейтрона паралельні. Якщо ж спіни протилежно напрямлені, то нейтрон і протон ядра не утворюють. Отже, ядерні сили мають спіновий характер.
7. Величина ядерних сил також залежить від взаємної орієнтації спіна та орбітального моменту кожного нуклона, тобто ядерні сили мають спін-орбітальний характер.
8. Ядерні сили не є центральними силами, тобто силами, які можна уявити такими, що діють по лінії, яка з'єднує центри взаємодіючих нуклонів.

Для пояснення властивостей ядерних сил - насичення і короткодії – В. Гейзенберг висунув гіпотезу про те, що ядерні сили є “обмінні сили”, тобто що ядерні сили між двома нуклонами забезпечуються третьою частинкою.

У 1935 р. японський фізик Х. Юкава висунув гіпотезу, що ядерні сили зумовлені невідомою на той час частинкою, маса якої становить 200-300 мас електрона. Оскільки ці гіпотетичні частинки за величиною маси займали проміжне місце між масою електрона і протона, то їх назвали мезонами (“мезос” – грецьке слово – середній). Такі частинки дійсно було виявлено у 1947 році в космічному випромінюванні.

Виявилось, що існує три типи π -мезонів: π^+ π^- π^0 . Заряди π^+ π^- за абсолютною величиною дорівнюють заряду електрона, маса зарядженого мезона $m_\pi = 273m_e$, маса π^0 – мезона $m_{\pi^0} = 264m_e$. Спін π -мезонів дорівнює нулю.

Ядерну взаємодію двох нуклонів, що знаходяться на відстані радіуса дії ядерних сил, можна представити у такий спосіб. Один нуклон випромінює π -мезон, а інший нуклон його поглинає упродовж 10^{-23}с (час прольоту частинки з швидкістю світла відстані між нуклонами – ядерний час). Частинки, які існують лише в області дії ядерних сил протягом ядерного часу, називаються віртуальними.