

Тема 10. ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

Зміст

Склад та розміри ядра	1
Дефект маси та енергія зв'язку ядра	1
Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду	2
Характеристики радіоактивних джерел	4

Склад та розміри ядра

Атомне **ядро** складається з елементарних частинок – **протонів** і **нейтронів**. Протон (p) має позитивний заряд, рівний заряду електрона і масу спокою $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, де m_e – маса електрона.

Нейтрон (n) – нейтральна частинка з масою спокою $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$. Протони і нейтрони називаються **нуклонами**. Загальне число нуклонів в атомному ядрі називається **масовим числом А**. Атомне ядро характеризується зарядом Ze , де Z – **зарядове число ядра**, рівне числу протонів в ядрі. Воно збігається з порядковим номером хімічного елемента у Періодичній системі елементів Менделєєва.

Ядро позначається символом ${}_Z^A X$, де X – символ хімічного елемента. Оскільки атом нейтральна система, то заряд ядра визначає і число електронів в електронній оболонці атома, а отже, зарядове число Z визначає хімічні властивості атома.

Ядра з однаковими Z , але різними A (тобто з різним числом нейтронів $N=A-Z$) називаються **ізотопами**, а ядра з однаковим A , але різними Z – **ізобарами**. Наприклад, добре відомі ізотопи водню: ${}_1^1H$ – протій ($Z=1, N=0$), ${}_1^2H$ – дейтерій ($Z=1, N=1$), ${}_1^3H$ – тритій ($Z=1, N=2$).

Радіус ядра задається емпіричною формулою $R = R_0 \sqrt[3]{A}$, де $R_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15}$ м. Густина ядерної речовини приблизно однакова для всіх ядер і становить близько 10^{17} кг/м³.

Дефект маси та енергія зв'язку ядра

З експерименту витікає, що маса ядра $m_{\text{я}}$ менша, ніж сума мас нуклонів, з яких воно складається. Із взаємозв'язку між масою та енергією ($E=mc^2$, де $c=3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі) витікає, що будь-якій зміні маси відповідає зміна енергії, отже при утворенні ядра повинна виділятися певна енергія. Із закону збереження енергії витікає: при

розділенні ядра на складові частини необхідно затратити таку ж кількість енергії, яка виділяється при його утворенні.

Енергія, яку необхідно затратити, щоб розщепити ядро на окремі нуклони, називається **енергією зв'язку ядра**:

$$E_{зв.} = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{я}) \cdot c^2,$$

де величина

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

називається **дефектом маси** ядра.

Формулу для енергії зв'язку ядра можна записати ще у такому вигляді:

$$E_{зв.} = (Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m) \cdot c^2,$$

де m_H – маса атома водню, m – маса відповідного атома.

Таким чином, можна записати енергію зв'язку ядра і в такому виді:

$$E_{зв.} = \Delta m c^2,$$

де Δm – дефект маси ядра; c – швидкість світла у вакуумі.

У позасистемних одиницях енергія зв'язку ядра дорівнює $E_{зв.} = 931 \Delta m$, де дефект маси Δm в а.е.м.; 931 – коефіцієнт пропорційності (1 а.е.м. \approx 931 МеВ). Ця енергія тоді буде виражена в МеВ (1 МеВ = 10^6 еВ = $1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж).

Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду

Ізотопи кожного хімічного елемента розділяються на стійкі та нестійкі. Ядра нестійких ізотопів здатні спонтанно (самовільно) розпадатися, перетворюючись при цьому в ядра інших елементів. Такі ізотопи називаються **радіоактивними**, а явище спонтанного перетворення ядер радіоактивних ізотопів – **радіоактивністю**.

Властивість радіоактивного перетворення ядер нестійких ізотопів зумовлена внутрішніми причинами і супроводжується випромінюванням γ -квантів, α - і β -частинок. Умовно радіоактивність поділяється на природну і штучну, залежно від того, як утворено нестійкий ізотоп – штучно чи він існує в природі.

α -розпад пов'язаний з викиданням частинок з ядра, які являють собою потік ядер гелію ${}^4_2\text{He}$, β^- – розпад – з викиданням електрона з ядра при перетворенні нейтрона в ядрі в протон. Надлишок енергії збуджених ядер радіоактивних продуктів звільняється при розпаді у вигляді γ -випромінювання, яке супроводжує усі типи радіоактивності і являє собою електромагнітне випромінювання з дуже короткою довжиною хвилі ($\lambda < 10^{-11}$ м).

Кількість радіоактивного препарату змінюється з часом за експоненціальним законом (рис. 1):

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

де N – кількість атомів радіоактивної речовини, що залишилась на момент часу t ; N_0 – початкова їх кількість (при $t = 0$).

Ця формула виражає закон радіоактивного розпаду, λ – постійна для даної радіоактивної речовини величина – називається сталою радіоактивного розпаду, вона зв'язана з періодом $T_{1/2}$ піврозпаду формулою:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}},$$

або

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Закон радіоактивного розпаду можна записати і так:

$$dN = -\lambda N dt,$$

де dN – число ядер, що розпадаються за інтервал часу dt ; N – число ядер, що не розпалися на момент часу t ; N_0 – число ядер у початковий момент ($t=0$); λ – стала радіоактивного розпаду.

Період піврозпаду $T_{1/2}$ характеризує швидкість розпаду радіоактивного ізоотпу, вимірюється часом, протягом якого число атомів ізоотпу зменшується наполовину.

Періоди піврозпаду для природно-радіоактивних елементів коливаються в межах від 10^{-4} с до 10^9 років.

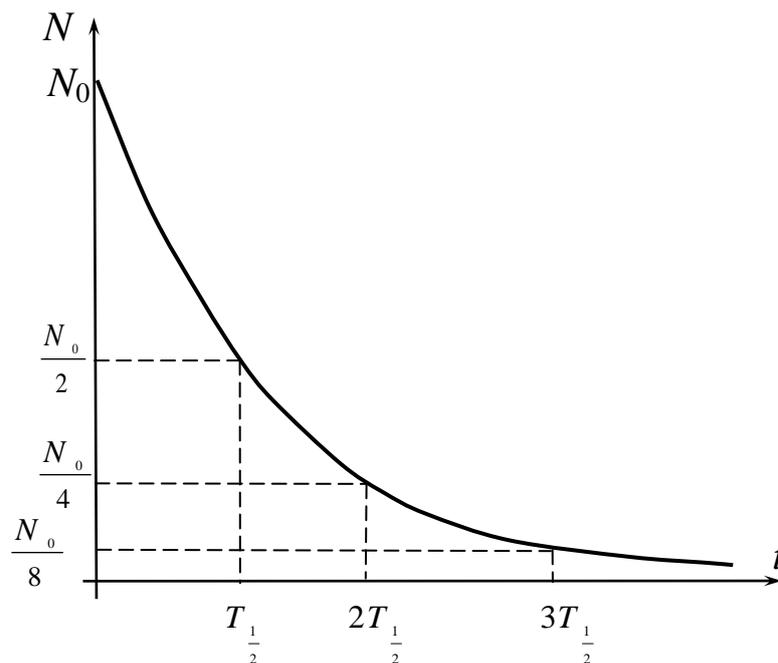


Рис. 1

Число ядер, які розпалися за час t :

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 \left(1 - e^{-\lambda t}\right).$$

У випадку, коли інтервал часу Δt , за який визначиться число ядер, що не розпалися, набагато менше періоду напіврозпаду $T_{1/2}$, число ядер, що розпалися можна визначити за формулою:

$$\Delta N = \lambda N \Delta t.$$

Середній час τ життя радіоактивного ядра – це інтервал часу, за який число ядер, що залишились, зменшиться в e раз:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Число N атомів, що містяться в радіоактивному ізотопі:

$$N = \frac{mN_A}{M},$$

де m – маса ізотопу; M – молярна маса; N_A – число Авогадро.

Активність A радіоактивного ізотопу:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \text{ чи } A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

де dN – число ядер, які розпадаються за інтервал часу dt ; A_0 – активність ізотопу в початковий момент часу.

Питома активність ізотопу:

$$\mathcal{A} = A/m.$$

Характеристики радіоактивних джерел

Важливою характеристикою радіоактивного джерела є фізична величина – **активність**. Вона дозволяє судити про його радіаційну безпеку, про кількість радіоактивних ядер тощо.

Активністю нукліда (загальна назва атомних ядер що відрізняється числом протонів Z і нейтронів N) в радіоактивному джерелі називається величина, яка вимірюється числом ядер, що розпалися за одиницю часу

$$a = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

Одиниця активності в СІ – беккерель (Бк): 1 Бк – активність нукліда, при якій за 1 с відбувається один акт розпаду. Позасистемна одиниця активності – кюрі (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Різні ядерні перетворення (ядерні реакції, радіоактивний розпад) супроводжуються випусканням різних видів радіоактивного випромінювання, яке несе в собі енергію і викликає іонізацію атомів середовища, через яке воно проходить. Найчастіше зустрічаються такі різновиди іонізуючих випромінювань як рентгенівське та γ -випромінювання, потоки α -частинок, електронів, нейтронів, протонів. Дія всіх видів іонізуючого випромінювання їх дія на речовину характеризується **дозою випромінювання**. Розрізняють дози випромінювання так.

1. Поглинута доза випромінювання.

Вважається, що зміни, які відбуваються в опроміненій речовині, повністю визначаються поглинутою енергією радіоактивного випромінювання.

Поглинута доза випромінювання – це фізична величина, яка вимірюється енергією будь-якого виду випромінювання, поглинутого одиницею маси опроміненої речовини.

Одиниця поглинутої дози випромінювання – **грей (Гр)**:

1 Гр=1 Дж/кг – це доза випромінювання, при якій опроміненій речовині масою 1 кг передається енергія будь-якого іонізуючого випромінювання в 1 Дж. Крім одиниці грей, використовують одиницю поглинутої дози випромінювання – **рад**:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр.}$$

2. Експозиційна доза випромінювання характеризує іонізуючу здатність рентгенівського і γ -випромінювання у повітрі. Експозиційна доза – фізична величина, яка вимірюється сумою електричних зарядів усіх іонів одного знака, створених іонізуючим випромінюванням в одиниці маси опроміненого повітря.

Одиниця експозиційної дози в СІ – **кулон на кілограм (Кл/кг)**, позасистемною одиницею є **рентген (Р)** :

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$$

3. Біологічна (еквівалентна) доза характеризує дію іонізуючого випромінювання на організм людини.

При однаковій поглинутій дозі різних видів випромінювання біологічні наслідки опромінення живих систем різні (наприклад, α -випромінювання в 20 разів небезпечніше, ніж γ -випромінювання, $Q=20$ – **коефіцієнт якості випромінювання**).

Біологічна доза – це фізична величина, яка визначається як добуток поглинутої дози на коефіцієнт якості випромінювання.

Одиниця еквівалентної дози в СІ називається **зіверт (Зв)**. Позасистемною одиницею біологічної дози є **бер (біологічний еквівалент рентгена)**: 1 бер – доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, що спричиняє таку ж біологічну дію, як і доза рентгенівського або γ -випромінювання в один рентген.

Для рентгенівського випромінювання ($Q=1$) один рад поглинутої дози відповідає одному беру.

При кількісних оцінках дії радіаційного опромінення радіаційними приладами вимірюється, як правило, **потужність** дози випромінювання і **потік** радіаційного випромінювання.

Поглинута доза, утворена в речовині за одиницю часу, називається потужністю поглинутої дози і вимірюється в одиницях **рад/с, Гр/с, рад/хв.** тощо. Потужність D експозиційної дози вимірюється в СІ в **амперах на кілограм (А/кг)**. Позасистемна одиниця потужності експозиційної дози – **рентген за годину (Р/год)**.

Потік γ -випромінювання – фізична величина, яка вимірюється енергією випромінювання, що проходить через поверхню детектора за одиницю часу.

Детальніше зупинимось на методах визначення активності радіонукліда та коефіцієнта поглинання γ -випромінювання.

Активність радіонукліда

Експериментально встановлено, що γ -випромінювання не є самостійним видом радіоактивності. Воно супроводжує процеси α і β -розпадів і не викликає зміни заряду і масового числа ядер.

γ -випромінювання випускається дочірніми ядрами, які в момент свого утворення виявляються збудженими. Надлишок енергії збуджених ядер звільняється у вигляді γ -випромінювання, яке являє собою короткохвильове електромагнітне випромінювання з гранично малою довжиною хвилі $\lambda \leq 0,01 \text{ нм}$ і внаслідок цього – чітко вираженими корпускулярними властивостями, тобто є потоком частинок – γ -квантів (фотонів).

На практиці зручно визначати активність радіоактивного нукліда за потоком γ -випромінювання, враховуючи, що одному акту розпаду ядра відповідає виліт одного γ -кванта (фотона).

Для потужності експозиційної дози γ -випромінювання, як і для будь-якого електромагнітного випромінювання, має місце закон

$$D = K_{\gamma} \cdot \frac{a}{r^2}$$

де a – активність радіонукліда; r – відстань від джерела випромінювання до детектора; K_{γ} – постійна, яка визначає тип радіонукліда, рівна потужності експозиційної дози γ -випромінювання від точкового джерела з одиничною активністю на одиничній відстані від нього. Наприклад, для радію-226

$$K_{\gamma} = 8,4 \cdot 10^6 \text{ мкР} \cdot \text{см}^2 / \text{год} \cdot \text{мКи}$$