

Лекція 13-14

Тема. Будова ядра.

1. Будова ядра.
2. Ядерні сили.
3. Енергія зв'язку. Зв'язок між масою і енергією.
4. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.
5. Правила зміщення.
6. Поділ ядер урану
7. Термоядерні реакції.
8. Енергія зірок. Керований термоядерний синтез. Проблема утилізації відходів. (самостійно)

1. Будова ядра.

Атомному ядру даного елемента, як і будь-якому іншому матеріальному об'єкту, притаманні певні характерні властивості, які виражають індивідуальність цього ядра: **електричний заряд, маса, електричний і магнітний моменти, енергія зв'язку** тощо.

Електричний заряд ядра кратний заряду електрона $e = \pm 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ і його можна представити у вигляді $q_{\text{я}} = eZ$, де Z – ціле число, яке називається атомним номером. Число Z визначає кількість протонів в ядрі та число електронів в атомі.

Іншою важливою характеристикою ядра є його маса. Маса ядер, як правило, вимірюють в атомних одиницях маси (а. о. м.). 1 а. о. м. дорівнює 1/12 маси атома вуглецю $^{12}_6\text{C}$.

1 а. о. м. = 1/12 маси атома $^{12}_6\text{C} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = (931,5016 \pm 0,0026) \text{ MeV}$. Енергетичний вираз маси отримано при використанні релятивістського співвідношення $E = mc^2$. Маса атомів сьогодні виміряно з великою точністю за допомогою сучасних мас-спектрометрів.

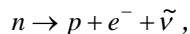
Згідно сучасним даним ядра складаються із частинок двох типів: **протонів і нейтронів**, які мають загальну назву **нуклонів**.

Протон (p) – позитивно заряджена частинка: його заряд за величиною дорівнює заряду електрона $e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, а його маса спокою $m_p = 1,007276 \text{ а. о. м.} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 938,28 \text{ MeV}$. Протон є ядром найпростішого атома – атома водню ^1_1H .

Протон, як і електрон, володіє власним механічним моментом – спіном, який дорівнює $\hbar/2$, та магнітним моментом, що дорівнює $\mu_p = +2,79 \mu_0$ (де $\mu_0 = e\hbar / 2 m_p c = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ – ядерний магнетон, який є одиницею магнітного моменту в ядерній фізиці).

Нейтрон – електронейтральна частинка ($q_n = 0$). Маса нейтрона $m_n = 1,008665 \text{ а. о. м.} = 1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 939,6 \text{ MeV}$.

У вільному стані нейтрон не стабільний і приблизно через 12 хв він розпадається за схемою:



тут позначення означають: n – нейтрон, p – протон, e^- – електрон, $\tilde{\nu}$ – елементарна частинка, яка називається **антинейтрино**.

Число протонів в ядрі дорівнює атомному номеру Z хімічного елемента. Загальне число нуклонів в ядрі позначається буквою A і називається **масовим числом**. Число нейтронів N в ядрі визначається так:

$$N = A - Z.$$

Щоб характеризувати дане ядро, необхідно вказати тільки A і Z . Як правило хімічні елементи прийнято позначати символом $^A_Z X$.

Атомні ядра (як і атоми, що їм відповідають) з однаковим числом Z , тобто з однаковим числом протонів, але різними масовими числами A (різною кількістю нейтронів), називаються **ізотопами**. Так, наприклад, в природі зустрічаються три стабільні ізотопи кисню: $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$, $^{18}_8\text{O}$; три стабільні ізотопи кремнію: $^{28}_{14}\text{Si}$, $^{29}_{14}\text{Si}$, $^{30}_{14}\text{Si}$. Водень має три ізотопи: ^1_1H , ^2_1H , ^3_1H . Сьогодні практично всі ядра мають по декілька ізотопів.

Ізотопи володіють однаковими хімічними і в принципі однаковими оптичними властивостями.

В першому наближенні атомні ядра можна вважати сферичними і ввести поняття радіуса R тієї сфери, яка обмежує ядерну речовину. Щоправда, про точні радіуси ядер говорити важко, оскільки ядро є системою частинок, для яких характерний корпускулярно-хвильовий дуалізм. Тому просторові розміри ядер дещо розмиті, а поняття радіуса є в якійсь мірі умовним.

Під розмірами ядер розуміють розміри тієї області, в якій проявляється дія ядерних сил. Приблизні розміри ядер були вперше визначені Резерфордом в дослідях по розсіянню заряджених частинок. Дослідження показують, що радіуси ядер залежать від числа нуклонів в ядрі, і достатньо добре виражаються формулою

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}. \quad (34.1)$$

де $R_0 = (1,4 - 1,5) \cdot 10^{-15}$ м.

Оскільки об'єм сфери $V = 4/3 \pi R^3$, то можна зробити висновок, що $V \sim A$, а це означає, що всі ядра мають приблизно **однакову густину**. Густина "ядерної речовини" надзвичайно велика. Вона дорівнює $\rho_{яд} \approx 1,8 \cdot 10^{17}$ кг/см³. Подібних густин для макроскопічних тіл в природі не зустрічається. Виключно висока густина "ядерної речовини" свідчить про те, що речовина в ядрах знаходиться в особливому специфічному ядерному стані, і, мабуть, тільки при такій високій густині "ядерна речовина" досягає деякого рівноважного стану.

Зауважимо, що поряд із зарядом і масою, ядро володіє **спіном** (власним механічним моментом), який обумовлений наявністю спінів у нуклонів. Якщо ядро складається із парного числа нуклонів, то спін ядра є парним, якщо ж число нуклонів, що входять в ядро, не парне, то спін ядра є півцілим (в одиницях \hbar).

Наявність у ядра механічного моменту призводить до появи у нього магнітного моменту, який обумовлений двома причинами: 1) спіновими магнітними моментами нуклонів, які входять до складу ядра; 2) орбітальним рухом протонів у ядрі.

2. Ядерні сили.

Величезна енергія зв'язку нуклонів в ядрі та значна густина ядерної речовини свідчать, що між нуклонами існує дуже інтенсивна взаємодія. Ця взаємодія носить характер притягання. Вона втримує нуклони на відстанях $\sim 10^{-15}$ м один від одного, не дивлячись на сильне кулонівське відштовхування між протонами. Сили взаємодії між нуклонами в ядрі не можна звести ні до гравітаційних, ні до магнітних, ні до кулонівських сил. Це особливий, специфічний вид сил, які отримали назву "**ядерних сил**". Розглянемо основні характеристики ядерних сил.

1. Ядерні сили характеризуються величезною інтенсивністю, яка забезпечує середню енергію зв'язку на нуклон (7 – 8,6) МеВ. Це надзвичайно велика енергія.

2. На відміну від гравітаційних і електромагнітних сил ядерні сили є короткодійними силами. Їх радіус дії складає $\sim 10^{-15}$ м і із збільшенням відстані між нуклонами вони дуже швидко зменшуються. На відстанях, більших R_0 (див. формулу (34.1)), ядерні сили практично дорівнюють нулю.

3. Ядерні сили володіють властивістю насичення, що свідчить про те, що кожний нуклон в ядрі взаємодіє з обмеженим числом найближчих сусідніх нуклонів. На це вказує той факт, що, починаючи з ${}^4_2\text{He}$, енергія зв'язку на один нуклон для всіх ядер приблизно однакова. Свідченням насичення ядерних сил є і те, що густина "ядерної речовини" приблизно однакова для різних ядер, оскільки об'єм ядра V пропорційний A .

4. Ядерні сили не залежать від заряду нуклонів. Сили взаємодії між двома протонами, протоном і нейтроном і двома нейтронами мають однакову величину. Ця властивість називається **зарядовою незалежністю ядерних сил**. Той факт, що густина "ядерної речовини" майже однакова для всіх ядер, теж вказує на те, що сили притягання між окремими нуклонами приблизно однакові.

5. Ядерні сили залежать від взаємної орієнтації спінів взаємодіючих нуклонів. Так, наприклад, нейтрон і протон втримуються разом, утворюючи ядро важкого водню ${}^2_1\text{H}$ (дейтрон) тільки в тому випадку, якщо їх спіни паралельні один одному.

6. Ядерні сили не є центральними. Їх не можна представляти направленими вздовж прямої, яка з'єднує центри взаємодіючих нуклонів. Нецентральність ядерних сил впливає і із того факту, що вони залежать від орієнтації спінів нуклонів.

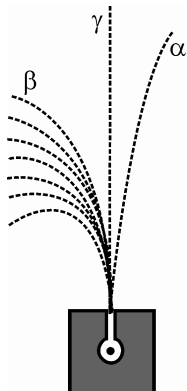


Рис. 34.1

3. Енергія зв'язку. Зв'язок між масою і енергією.

Дуже точні експериментальні вимірювання атомних мас хімічних елементів показали, що їх маси дещо менші від сумарних мас нуклонів, які входять до складу ядер. Наприклад, маса нейтрального атома ${}^4_2\text{He}$ дорівнює $m({}^4_2\text{He}) = 4,002603$ а. о. м. Сумарна маса двох нейтронів і двох протонів (включаючи масу двох електронів $m_e = 0,00054858$ а. о. м.) дорівнює: $2m_p + 2m_n + 2m_e = 2(1,007276 \text{ а. о. м.}) + 2(1,008665 \text{ а. о. м.}) + 2(0,00054858 \text{ а. о. м.}) = 4,032979 \text{ а. о. м.}$ Виміряна маса ${}^4_2\text{He}$ на величину $\Delta M = 4,032979 \text{ а. о. м.} - 4,002603 \text{ а. о. м.} = 0,030376 \text{ а. о. м.}$ менша сумарної маси нуклонів, які входять в склад ядра ${}^4_2\text{He}$. Цю різницю в масах називають **дефектом маси ядра**.

Згідно закону взаємозв'язку маси і енергії ($E = mc^2$) дефект маси ΔM , що виникає при утворенні ядра, є ознакою того, що при утворенні ядра вивільняється певна енергія системи. Ця енергія є мірою міцності ядра і називається **повною енергією зв'язку** атомного ядра, і ми її будемо позначати $E_{зв}$. Вона показує, **яку енергію потрібно затратити, щоб розділити ядро на його складові – протони і нейтрони**. Щоб стабільне ядро розділити на його складові - протони і нейтрони, необхідно затратити як мінімум енергію, що рівна енергії зв'язку. Таким чином для енергії зв'язку можна записати формулу:

$$E_{зв} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - M_яc^2, \quad (34.2)$$

де $M_я$ – маса ядра, m_p і m_n – відповідно маси вільних протона і нейтрона, $N = A - Z$. Кожну масу в формулі (34.2) ми помножили на c^2 , щоб отримати відповідну їй енергію.

Оскільки маса виражається в а. о. м., то, перемножуючи дефект маси $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я$ на перевідний множник (1 а. о. м. = 931,5 MeV), отримаємо енергію зв'язку в MeV:

$$E_{зв} = (Zm_p + Nm_n - M_я) 931,5 \text{ MeV}. \quad (34.3)$$

Зауважимо, що енергія зв'язку нуклонів в ядрі гелію в мільйони разів перевищує енергію зв'язку валентних електронів в атомах, де вона становить 1 – 10 eV. Надзвичайно великі значення енергії зв'язку атомних ядер свідчать про існування надзвичайно великих ядерних сил взаємодій між нуклонами в межах ядра.

Іноді користуються поняттям **питомої енергії зв'язку ядра**, тобто **енергії зв'язку, розрахованої на один нуклон в будь-якому ядрі**. Питому енергію зв'язку ядра можна розрахувати, якщо повну енергію зв'язку ядра поділити на число нуклонів в ньому.

4. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.

В 1896 р. французький фізик Анрі Беккерель (1852 - 1891), вивчаючи люмінесценцію різних речовин, виявив, що солі урану випромінюють невідомі промені без попереднього їх освітлення. Це випромінювання здатне викликати почорніння фотопластинки, іонізувати газ, збуджувати флуоресценцію, викликати хімічну і біологічну дію, володіє великою проникаючою здатністю.

Подальші дослідження, проведені П. Кюрі і М. Складовською – Кюрі, Резерфордом і іншими вченими, показали, що здатність випромінювати подібні промені властива не тільки для урану, а й для ряду інших хімічних елементів, зокрема полонію (Po), радію (Ra),

актинію (Ac), торію (Th). Цікавою особливістю виявленого випромінювання є його самочинність і сталість, повна незалежність від зміни зовнішніх умов і тиску, температури, освітленості тощо. За пропозицією М. Складовської – Кюрі речовини, які здатні випромінювати відкрите Беккерелем випромінювання, назвали **радіоактивними**, а саме явище – **радіоактивністю**.

Подальші дослідження показали, що радіоактивне випромінювання складається з трьох видів променів: α , β і γ . За характером відхилення променів в магнітному полі (рис. 34.1) було встановлено, що α – промені – це позитивно заряджені частинки і вони є ядрами гелію (${}^4_2\text{He}$); β – промені є потік швидких електронів. Енергія β – частинок може сягати 10 МеВ, що відповідає їх швидкості, близької до швидкості світла у вакуумі; γ – промені не зазнають відхилення в магнітному полі – це жорстке електромагнітне випромінювання і має найбільшу проникну здатність. На рис 34.2 наведено порівняння проникаючої здатності α -, β – частинок і γ – квантів (з однаковою енергією), а також рентгенівського випромінювання (енергія 40

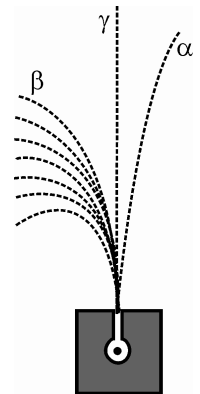


Рис. 34.1

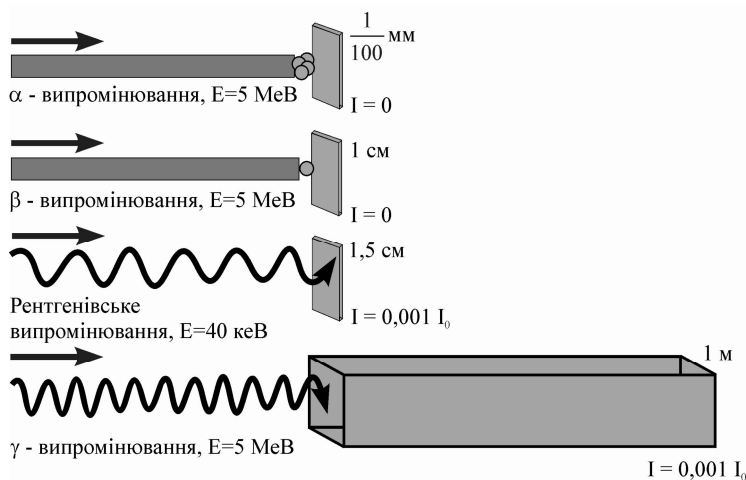


Рис. 34.2

МеВ) в алюмінії.

Як уже відмічалось вище радіоактивний розпад – це властивість самого атомного ядра і залежить він тільки від його внутрішнього стану. Не можна вплинути на протікання процесу радіоактивного розпаду, не змінивши стану ядра.

Спробуємо встановити закон радіоактивного розпаду. Нехай N – число атомів в зразку в даний момент часу t . Тоді число атомів dN , що розпалися за інтервал часу від t до $t + dt$ дорівнюватиме:

$$dN = -\lambda N dt, \quad (34.4)$$

де λ – стала величина, яка характерна для радіоактивної речовини і називається **сталою розпаду**. Знак "-" тут вказує, що кількість атомів N , які не розпалися, зменшується з часом. Із (34.4) випливає, що стала розпаду являє собою відносне зменшення числа ядер, які зазнають розпаду за одиницю часу:

$$\lambda = \frac{-dN / N}{dt}. \quad (34.5)$$

Інакше кажучи, стала розпаду характеризує долю ядер, які розпадаються, за одиницю часу, тобто визначає **швидкість** радіоактивного розпаду.

Перетворивши рівняння (34.5) до вигляду

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt,$$

можна знайти N як функцію часу t . Для цього проінтегруємо останній вираз від $t = 0$ до $t = t$:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt,$$

де N_0 – число материнських ядер при $t = 0$ (первісне число ядер), а N – число ядер, що залишилися на момент часу t . Інтегруючи, отримуємо

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

або

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (34.6)$$

Співвідношення (34.6) називається **законом радіоактивного розпаду** із якого видно, що число радіоактивних ядер в даному зразку зменшується з часом експоненціально (рис. 34.3). Цей закон є статистичний і виконується строго лише для дуже великого числа ядер N , що розпадаються. Якщо число ядер, що розпадаються не дуже велике, то як і в будь-якому іншому статистичному явищі, будуть спостерігатися флуктуації.

Швидкість розпаду або число розпадів за одиницю часу в чистому зразку дорівнює dN/dt . Ця величина називається **активністю** даного радіоактивного препарату. Із співвідношень (34.4) і (34.6) слідує, що

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (34.7)$$

Таким чином має місце формула

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (34.8)$$

де $A_0 = -\lambda N_0$ – початкова активність, $A = \lambda N$ – активність препарату в момент часу t . Із (34.8) видно, що активність радіоактивного препарату зменшується за експоненціальним законом (рис. 34.4).

За одиницю активності взято активність препарату, в якому відбувається один розпад за секунду. Цю одиницю називають **беккерель (Бк)**. Іноді користуються позасистемною

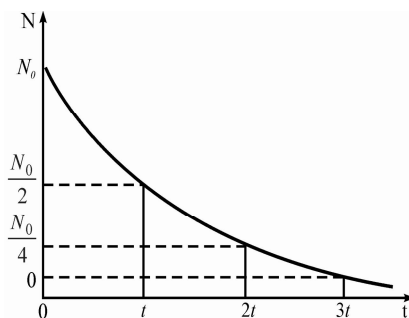


Рис. 34.3

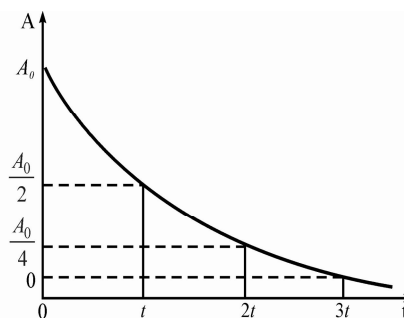


Рис. 34.4

одиницею активності препарату – **кюрі (Ки)**: $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{Бк}$. Таку активність має 1 г радію – ($^{226}_{88}\text{Ra}$).

Обернена величина сталої радіоактивного розпаду λ називається **середньою тривалістю життя** радіоактивного атома

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (34.9)$$

Враховуючи (34.9), формулу (34.6) іноді записують у вигляді

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Часто для характеристики тривалості життя радіоактивного ізотопу користуються поняттям періоду піврозпаду T . **Періодом піврозпаду називають час, на протязі якого розпадається половина початкової кількості даної радіоактивної речовини.**

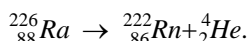
5. Правила зміщення

Як уже відмічалось вище (§ 34.4) існують три види радіоактивного розпаду: α -, β - і γ -розпад.

α - розпад. Більшість важких ядер (при $Z \geq 84, A \geq 208$) розпадаються з випромінюванням α - частинок за схемою:



де ${}^A_Z X$ – материнське ядро (ядро, що розпадається), ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ – дочірнє ядро (ядро, що утворилося), $\alpha ({}^4_2 He)$ - частинка, яка є ядром гелію. Наприклад,



Таким чином, внаслідок α -розпаду утворюється **новий хімічний елемент**: дочірнє ядро (в нашому прикладі ${}^{222}_{86} Rn$). Причому новий хімічний елемент (${}^{222}_{86} Rn$) розміщений в таблиці Менделєєва на дві клітинки зліва від вихідного елемента (${}^{226}_{88} Ra$). Ядра радону також радіоактивні і служать потужними випромінювачами α -частинок. Він зустрічається в природних джерелах, вода яких, як прийнято вважати, володіє лікувальними властивостями.

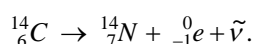
Зауважимо, що при випромінюванні α - частинок ядро може знаходитись в збудженому стані, тому при переході в основний стан воно може випромінювати γ -фотон.

β – розпад. β - розпадом називають процес спонтанного перетворення нестабільного ядра в ядро із зарядом, відмінним на $\Delta Z = \pm 1$ за рахунок випромінювання електрона (e^-) або позитрона (e^+).

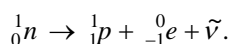
Перший тип β - розпаду (з випромінюванням електрона) відбувається за схемою



де ${}^A_Z X$ – материнське ядро, ${}^A_{Z+1} Y$ – дочірнє ядро, ${}^0_{-1} e$ – електрон, $\tilde{\nu}$ – антинейтрино. Наприклад,



Процес β - розпаду зводиться до перетворення нейтрона в протон за схемою



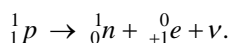
Таким чином, випромінюваний електрон не має ніякого відношення до орбітальних електронів в атомі, він народжується в самому ядрі.

Із (34.12) видно, що ядро, яке утворилося при β - розпаді з випромінюванням електрона знаходиться в таблиці Менделєєва на одну клітинку справа від вихідного елемента.

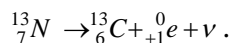
Другий тип β -розпаду (з випромінюванням позитрона) відбувається за схемою:



де ${}^A_Z X$ – материнське ядро, ${}^A_{Z-1} Y$ – дочірнє ядро, ${}^0_{+1} e$ – позитрон (частинка за всіма властивостями схожа на електрон, але заряд має додатний), ν – нейтрино. В цьому випадку один із протонів перетворюється в нейтрон за схемою



Наприклад,



Таким чином, у випадку другого типу β^- -розпаду (з випромінюванням позитрона) утворюється ядро атома (в нашому прикладі $^{13}_6C$), що знаходиться в таблиці Менделєєва на одну клітинку зліва від вихідного елемента.

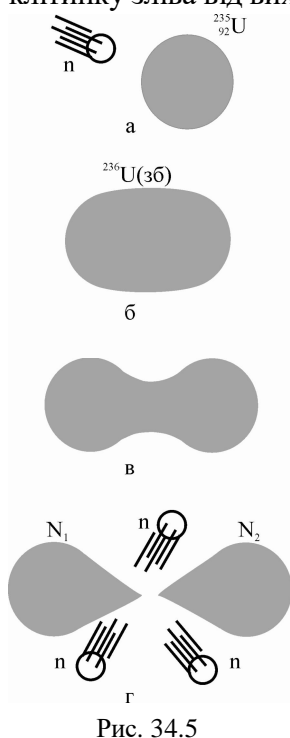
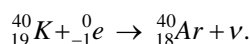


Рис. 34.5

Поряд з випромінюванням β^- і β^+ -частинок (так часто позначають випромінювання електрона ($^0_{-1}e$) і позитрона ($^0_{+1}e$) існує ще і третій процес того ж типу. Він називається **захопленням електрона** і заключається в поглинанні ядром одного із орбітальних електронів свого ж атома, в результаті чого один із протонів ядра перетворюється в нейтрон, випромінюючи при цьому нейтрино ($^1_1p + ^0_{-1}e \rightarrow ^1_0n + \nu$). Цей процес відбувається за схемою:



Наприклад, ядро калію $^{40}_{19}K$ при захопленні електрона перетворюється в ядро аргону $^{40}_{18}Ar$:



Як правило, захоплення електрона відбувається із самої внутрішньої К-оболонки атома, звідси і назва "К-захоплення". Місце в К – електронній оболонці, яке звільнилося в результаті захоплення, заповнюється електронами із вищих електронних оболонок, в результаті чого виникає рентгенівське випромінювання. Саме по такому випромінюванню і було відкрито К – захоплення Альваресом (США) у 1937 р.

Із (34.14) видно, що в результаті К-захоплення утворюється ядро атома хімічного елемента, який знаходиться в таблиці Менделєєва на одну клітинку зліва від материнського елемента.

Вирази (34.11 – 34.13) називають **правилами зміщення** радіоактивного елемента в періодичній таблиці елементів Менделєєва.

При всіх трьох видах β^- -розпаду можливе випромінювання γ -фотона.

γ – розпад. Стабільні ядра, як правило, знаходяться в станах з найменшою енергією або в своїх основних станах. Однак, подібно атому, ядра можна перевести в збуджені стани, бомбардуючи їх частинками або фотонами великих енергій. Повертаючись в стан з більш низькою енергією або основний стан, ядро випромінює γ -фотон. Цей процес відбувається частіше за все. Схематично процес γ -розпаду записується так:



Зірочка в (34.15) означає, що ядро є збудженим. Обидва ядра: і материнське і дочірнє – мають однаковий склад нуклонів (протонів і нейтронів), γ -розпад, як і α - і β^- -розпади, відбувається з обов'язковим виконанням законів збереження маси – енергії і імпульсу.

6. Поділ ядер урану

У 1938 р. німецькі фізики Отто Ган (1879–1968) і Фріц Штрассман (1902–) виявили, що при бомбардуванні урану нейтронами виникають ядра приблизно вдвічі легші, ніж вихідне ядро урану. Дальші ретельні дослідження показали, що в результаті опромінення урану нейтронами утворюються елементи лантан $^{139}_{57}La$ і барій $^{137}_{56}Ba$.

Ці результати в 1939 р. австрійські фізики Ліза Мейтнер (1878–1968) і Отто Фріш (1904–) пояснили так: ядро урану, поглинувши нейтрон, розпадається на дві приблизно рівні частини. Таке перетворення виглядало незвично, оскільки до цього всі відомі реакції супроводжувалися вильотом із ядра окремих частинок (наприклад, n , p або α).

Нове явище отримало назву **поділу ядра**. Виявилось, що ізоотп ${}^{235}_{92}\text{U}$ ділиться легше ніж

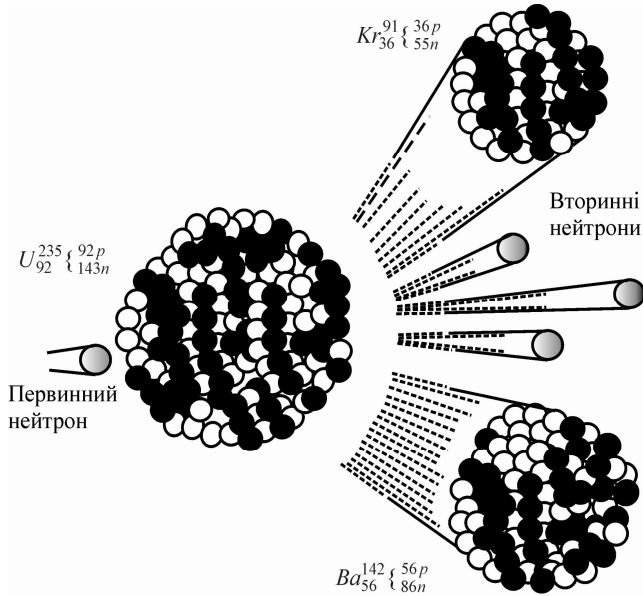


Рис. 34.6

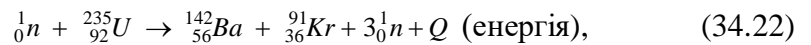
більш поширений в природі ізоотп ${}^{238}_{92}\text{U}$. При кожному акті поділу ${}^{235}_{92}\text{U}$ виділяється ~ 200 МеВ енергії, внаслідок чого обидва осколки, розлітаючись майже в протилежних напрямках, володіють великою кінетичною енергією.

Процес поділу можна наочно зобразити, уявивши ядро урану у вигляді краплі рідини. Відповідно цієї **краплинної моделі** ядра, нейтрон при поглинанні ядром ${}^{235}_{92}\text{U}$ передає йому додаткову внутрішню енергію (подібно до нагрівання краплі води) (рис. 34.5, а). Утворюється проміжний стан, або збуджене ядро ${}^{236}_{92}\text{U}$. Надлишкова енергія цього ядра призводить до більш інтенсивного руху окремих нуклонів, в результаті чого ядро набуває подовженої форми (рис. 34.5, б). Коли ядро набуває

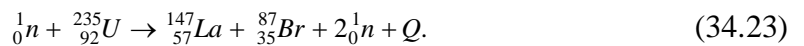
форми, зображеної на рис. 34.5, в, короткодіюча ядерна взаємодія нуклонів слабне внаслідок збільшення відстані між ними, а електростатичне відштовхування стає домінуючим, в результаті чого ядро розщеплюється на дві частини. Ядра N_1 і N_2 , які утворилися в результаті цього процесу, називають **осколками поділу** (рис. 34.5, г).

Важливим є і те, що поділ ядра супроводжується випромінюванням кількох нейтронів. Проміжне ядро існує менше 10^{-12} с, тому процес поділу протікає дуже швидко.

Ядра (продукти поділу) можуть бути різноманітними. Найбільш типовим прикладом реакції поділу є:



На рис. 34.6 наведена схема цього поділу. Можливий також поділ



Продукти поділу найрізноманітніші, їх нараховується більше двісті видів. В результаті реакції поділу вивільняється велика кількість енергії. Так в кожному акті поділу ядра урану виділяється енергія ~ 200 МеВ. В ядерному масштабі – це величезна енергія. З практичної точки зору енергія, що виділяється при одному акті поділу, дуже мала. Але якщо одночасно ділиться велика кількість ядер урану, то в макроскопічних масштабах буде виділятися фантастично велика кількість енергії.

Виникнення при кожному акті поділу ядер кількох нейтронів робить можливим здійснення **ланцюгової реакції**. Дійсно, якщо ядром випромінено Z нейтронів, то вони можуть викликати поділ Z нових ядер, в результаті чого буде випромінено Z^2 нейтронів, які в свою чергу викличуть поділ Z^2 ядер і т. д. Таким чином, кількість нейтронів, які народжуються, росте в геометричній прогресії (рис. 34.7).

Однак, так було б в ідеальній системі. В дійсності далеко не всі народжені нейтрони поглинаються ядрами. Частина з них вилітає назовні, не взаємодіючи з ядрами, частина поглинається ядрами домішок, які не діляться, внаслідок чого вони також не прийматимуть участі в реакції. Розрахунки показують, що відносна доля нейтронів, які вилітають назовні, зменшується з ростом маси речовини, що ділиться.

Природний уран містить 99,27 % ізоотпу ${}^{238}_{92}\text{U}$, 0,72 % ${}^{235}_{92}\text{U}$ і $\sim 0,01$ % ${}^{234}_{92}\text{U}$. Оскільки під дією нейтронів можуть ділитися тільки ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$, то в природному урані ланцюгова реакція не виникає.

Ланцюгова реакція в урані може бути здійснена двома способами. Суть першого способу заключається у виділенні із природного урану ізотопу $^{235}_{92}\text{U}$ який ділиться. Хоча ця задача не із легких, вона була розв'язана.

В шматку чистого $^{235}_{92}\text{U}$ (або $^{239}_{94}\text{Pu}$) при кожному поділі ядра виникає $\sim 2,5$ нових нейтронів. Однак, якщо маса такого шматка менша певного критичного значення, то більшість випромінених нейтронів вилітають назовні, не викликаючи поділу, і ланцюгова реакція не виникає. За підрахунками В. Гейзенберга*, маса урану повинна бути не менше 9 кг (критична маса). При масі урану ≥ 9 кг нейтрони швидко розмножуються, і реакція набуває вибухового характеру. На цьому принципі ґрунтується дія атомної бомби.

В атомній бомбі ядерний заряд представляє собою два або більше шматків майже чистого $^{235}_{92}\text{U}$ або $^{239}_{94}\text{Pu}$. Маса кожного шматка, менша критичної, внаслідок чого ланцюгова реакція не виникає. Щоб відбувся вибух достатньо зблизити шматки ядерного заряду і утворити надкритичну масу, а в земній атмосфері завжди є певна кількість нейтронів, народжених космічними променями, які розпочнуть процес поділу ядер.

Інший спосіб здійснення ланцюгової реакції використовується в **ядерних реакторах**, перший із яких був побудований Е. Фермі* із співробітниками в Чикагському університеті (США) у 1942 р. В реакторах в якості ядерної речовини, що ділиться, використовують природний (або дещо збагачений) ізотоп урану $^{235}_{92}\text{U}$. Щоб не допустити захоплення нейтронів ядрами $^{235}_{92}\text{U}$, невеликі блоки ядерної речовини розміщують на деякій відстані один від одного, а проміжки між блоками заповнюють сповільнювачем, речовиною, в якій швидкі нейтрони сповільнюються до теплових швидкостей.

В якості сповільнювачів використовують **важку воду** - це вода, в молекулах якої атоми водню ^1_1H замінені атомами дейтерію ^2_1H , **графіт**, який складається з атомів вуглецю $^{12}_6\text{C}$ і **берилій** (Be).

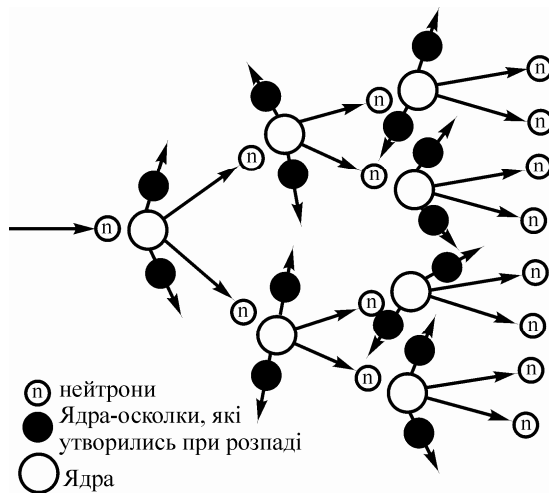


Рис. 34.7

Для самопідтримуючої ланцюгової реакції в середньому принаймні один нейтрон, який виникає при кожному акті поділу, повинен викликати поділ одного ядра на наступному етапі. Середнє число нейтронів в кожному акті поділу, які викликають поділ інших ядер, називається **коефіцієнтом розмноження нейтронів** k . Для самопідтримуючої ланцюгової реакції повинна виконуватись нерівність $k \geq 1$. При $k < 1$ реактор називається **підкритичним**, при $k > 1$ - **надкритичним**. В реакторах є рухомі стержні для регулювання процесів в ньому. Ці

стержні містять кадмій ($^{112}_{48}\text{Cd}$) і бор ($^{11}_5\text{B}$), які інтенсивно поглинають нейтрони. Введення стержнів в реактор зменшує коефіцієнт розмноження нейтронів, а виведення - збільшує. Спеціальний автоматичний пристрій керує стержнями так, щоб підтримувати потужність, що розвивається в реакторі на заданому рівні.

Схема уран-графітового реактора наведена на рис. 34.8. Тут цифрою 1 позначено сповільнювач-графіт, 2 – блоки із урану (твели), 3 – рухомі стержні.

* **Вернер Гейзенберг (1901–1976)** – німецький фізик – теоретик, лауреат Нобелівської премії (1932 р.) за розробку матричної механіки – перший варіант квантової механіки.

* **Енріко Фермі (1901–1954)** – видатний італійський фізик, лауреат Нобелівської премії (1938 р.) за відкриття штучної радіоактивності, викликаної бомбардуванням повільними нейтронами.

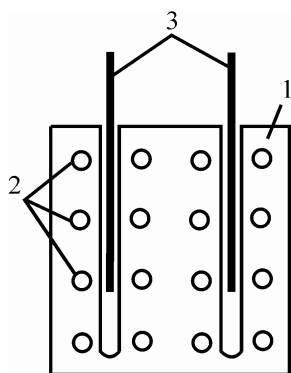


Рис. 34.8

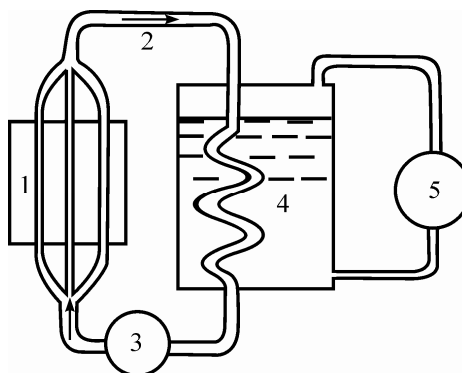


Рис. 34.9

Перші промислові реактори використовувалися для виробництва ядерної речовини для атомних бомб – плутонію.

Застосування атомної енергії в мирних цілях вперше здійснено в СРСР під керівництвом І.В. Курчатова^{**}. В 1954 р. в Радянському Союзі була введена в експлуатацію перша атомна електростанція потужністю 5000 кВт. На рис. 34.9 зображена схема атомної електростанції. Тепло, яке виділяється в зоні реактора 1, відводиться теплоносієм (вода або рідкий натрій), який циркулює в контурі 2. Циркуляція забезпечується насосом 3. В теплообміннику 4 теплоносій віддає своє тепло воді, перетворюючи її в пару, яка обертає турбіну 5.

6. Термоядерні реакції.

Термоядерні реакції – це реакції синтезу (злиття) легких ядер в одне ядро, які супроводжуються виділенням величезної кількості енергії. Однак, щоб зблизити ядра на відстань дії ядерних сил $\sim 2 \cdot 10^{-15}$ м потрібно виконати роботу проти сил електростатичного відштовхування

$$A = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R_{\text{я}}}$$

де Z_1 і Z_2 – порядкові номери елементів, $R_{\text{я}} \approx 2 \cdot 10^{-15}$ м – радіус дії ядерних сил, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Н·м² – електрична стала. Навіть для ядер з $Z_1 = Z_2 = 1$ (ядер ізотопу водню (^1_1H , ^2_1H , ^3_1H)), ця робота дорівнює

$$A = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R_{\text{я}}} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{4(3,14)(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot \text{м}^2)(2 \cdot 10^{-15} \text{ м})} = 1,15 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 0,72 \text{ МеВ}.$$

Для виконання цієї роботи кожна з двох частинок повинна володіти кінетичною енергією

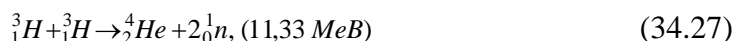
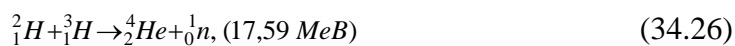
$$\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} (1,15 \cdot 10^{-13}) \text{ Дж},$$

звідки випливає, що реакція повинна проходити при температурі $T \approx 2 \cdot 10^9$ К. Таким чином, синтез ядер повинен проходити при дуже високих температурах. У зв'язку з цим ці реакції називають ще **термоядерними**. Однак досвід показує, що деякі термоядерні реакції можуть протікати і при значно нижчих температурах порядку 10^7 К.

Сприятливіші умови існують для реакцій ізотопів водню, які можуть давати такі чотири типи реакцій (в дужках показано енерговиділення):



^{**} Курчатов І.В. (1903–1960) – радянський фізик, організатор радянської ядерної науки, тричі Герой Соціалістичної Праці (1949, 1951, 1954 рр.), лауреат Ленінської (1957 р.) і державних премій (1942, 1949, 1951, 1954 рр.).



З найбільшою вірогідністю відбувається реакція синтезу дейтерію і тритію (34.26). При тій самій температурі синтез дейтерію і тритію відбувається в 100 разів швидше ніж ядер дейтерію((34.24) і (34.25)) і синтез ядер тритію (34.27).

Як видно (34.24) – (34.27), ядерний синтез, як і поділ важких ядер, супроводжується виділенням великої кількості енергії. Однак, оскільки питома енергія зв'язку (середня енергія зв'язку на один нуклон) у легких ядер менша, ніж у проміжних ядер (з A від 50 до 100), то в реакціях синтезу виділяється більша енергія а ніж при поділі ядер. Розрахунки показують, що в результаті повної реакції синтезу ядер 1 кг суміші дейтерію і тритію виділяється енергія $E = 72 \cdot 10^{13}$ Дж, яка у вісім разів більша від енергії поділу 1 кг ${}^{235}_{92}\text{U}$.

Перша термоядерна реакція дейтерію і тритію була здійснена в 1953 р. в СРСР у вигляді вибуху потужної водневої бомби. У водневої бомби термоядерна реакція носить неконтрольований характер.

Вивільнення величезної кількості енергії в реакціях синтезу та великі запаси ядерного пального (дейтерій в необмеженій кількості міститься в морській воді ~ 1 г на 60 л води, що еквівалентно 400 л нафти), роблять актуальною проблему здійснення керованих термоядерних реакцій, однак для цього потрібно розв'язати цілий ряд серйозних і важливих технічних проблем. Одна із них – розігрів дейтерію в певному обмеженому об'ємі до температури 10^8 К, при якій речовина існує у вигляді плазми. Ще складнішою є проблема створення місткості, в якій можна б втримувати гарячу плазму при високому тиску, який необхідний для початку ядерної реакції злиття. Зрозуміло, що звичайна місткість для цієї мети не годиться, оскільки при такій температурі сама місткість перетворилася б в плазму. Тому зараз робляться спроби, і не безуспішні, втримати плазму і контролювати її поведінку за допомогою магнітного поля спеціальної форми. Є надії, що при відповідній напруженості поля і його форми (у вигляді тороїда) в такій "магнітній пляшці" вдасться нагріти плазму до потрібної температури і довести її до таких високих тисків, які потрібні для початку ядерної реакції злиття.

Інша цікава можливість - використовувати потужний ($P_{\text{max}} \approx 5$ ГВт) імпульсний лазер на неодимовому склі. Припускається, що за допомогою такого лазера вдасться досягнути температури плазми 7–10 млн. К. Реакція ядерного злиття повинна буде проходити в мішенях твердого дейтерію у вигляді дрібних крупинок.

Непростою справою є і вимірювання температур в мільйон градусів. Можна б вимірювати температуру за розширенням спектральних ліній, однак при вказаних температурах водень повністю іонізується і в спектрі випромінювання його ліній немає. Тому з цією метою використовують малі домішки азоту, атоми якого повністю не іонізуються і зберігають спектральні лінії у випромінюванні навіть при таких температурах.