

## Лекція №9. Радіоактивність. Ядерні реакції. Реакції поділу та синтезу ядер. Ядерний реактор

### **94. Радіоактивність. Основний закон радіоактивного перетворення атомних ядер**

Радіоактивністю називають самовільне (спонтанне) перетворення ядер нестійких ізотопів одних елементів у ядра ізотопів інших елементів, що зумовлено внутрішніми причинами та супроводжується  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$  -випромінюванням, а також інших частинок (нейтронів, протонів).

До радіоактивних процесів належать:

- 1)  $\alpha$ -розпад;
- 2)  $\beta$  -розпад;
- 3)  $\gamma$ -випромінювання;
- 4) спонтанний поділ тяжких ядер;
- 5) протонна радіоактивність.

Радіоактивність, яка спостерігається у ядер, що існують у природних умовах називається природною. Радіоактивність ядер, які отримані за допомогою ядерних реакцій, називається штучною. Між природною та штучною радіоактивністю немає принципової різниці. Природні радіоактивні перетворення ядер, які відбуваються самочинно, називаються радіоактивним розпадом. Ядро, що виникло внаслідок розпаду, називають дочірнім ядром, а ядро, яке розпалося, - материнським.

Теорія, яка пояснює це явище, ґрунтується на припущенні, що радіоактивний розпад є спонтанним процесом.

Численні досліди показали, що на швидкість радіоактивного розпаду не впливають ніякі зовнішні зміни температури, тиску, наявності електричних і магнітних полів, вид хімічної сполуки, її агрегатний стан.

Внаслідок самочинності цього процесу природно припустити, що кількість ядер  $dN$ , які розпадаються за інтервал часу від  $t$  до  $t+dt$ , пропорційне проміжку часу  $dt$  і кількості  $N$  наявних ядер, які ще не розпались на момент часу  $t$ :

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

Тут  $\lambda$  - стала величина, яку називають сталою розпаду, або радіоактивною сталою. Знак “-” вказує на те, що загальна кількість радіоактивних ядер під час розпаду зменшується.

Стала розпаду

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

дорівнює відносному зменшенню кількості ядер, які зазнають розпаду, за одиницю часу. Стала  $\lambda$  визначає швидкість радіоактивного розпаду.

Відокремивши в рівнянні  $dN = -\lambda N dt$  змінні та проінтегрувавши, отримуємо:

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

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

Звідси

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

Цей вираз виражає закон радіоактивного розпаду, згідно з яким кількість атомів, які не розпались, зменшується за експонентою. У цій формулі  $N_0$  – початкова кількість ядер, які не розпались (в момент часу  $t=0$ ),  $N$  – кількість ядер, які не розпались в момент часу  $t$ .

Кількість ядер, які розпались за час  $t$ , визначається виразом

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

Для характеристики стійкості ядер відносно розпаду, для оцінки тривалості життя певного радіоактивного ізотопу вводять поняття про період піврозпаду  $T$ . Так називається час, протягом якого початкова кількість ядер певної речовини розпадається наполовину.

### З визначення $T$ випливає:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T}.$$

Звідси отримуємо:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Періоди напіврозпаду різних природних ізотопів досить відрізняються один від одного. Так,  $T=4,51 \cdot 10^9$  років для  ${}_{92}^{238}\text{U}$  і  $T=3 \cdot 10^{-7}$  с для  ${}_{84}^{212}\text{Po}$ .

Кількість атомів, що розпадається за одну секунду, називається активністю елемента. Активність  $A$  описують такими формулами:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

Отже, активність обернено пропорційна до періоду напіврозпаду і зменшується з часом за експоненціальним законом.

Радіоактивний розпад записують у вигляді рівняння



де  ${}_{Z_1}X^{A_1}$  – материнське радіоактивне ядро,  ${}_{Z_1}Y^{A_2}$  – дочірнє ядро (продукт розпаду),  $a$  – частинка, яка випускається.

При радіоактивному розпаді справджується закон збереження енергії, згідно з яким повна енергія материнського ядра дорівнює повній енергії продуктів розпаду:

$$m_x c^2 = (m_y + m_a) c^2 + E_p,$$

тут  $E_p$  – повна енергія розпаду, яка дорівнює зміні енергії спокою материнського ядра, що перетворюється в кінетичну енергію дочірнього ядра, вилітаючої частинки і  $\gamma$ -квантів.

При радіоактивному розпаді ядер виконується закон збереження електричних зарядів:

де  $Z_{\text{я}}$  – заряд ядра, яке зазнало розпаду;  $Z_i$  – заряди ядер і частинок, що виникли внаслідок розпаду.

Крім того, виконується правило збереження масових чисел:

$$A_{\text{я}} = \sum_i A_i$$

Ядро, яке зазнало  $\alpha$ -розпаду, зміщується на два місця лівіше в періодичній системі елементів. Вилітання  $\alpha$ -частинки супроводжується зменшенням масового числа на 4 одиниці. При  $\beta$ -розпаді позитивний заряд ядра збільшується на одну одиницю і ядро зміщується на одне місце правіше в періодичній системі. При цьому масове число ядра не змінюється.

Ядра, які виникають внаслідок радіоактивного розпаду, також можуть бути радіоактивними. Послідовність такого процесу приводить до виникнення ланцюжка радіоактивних перетворень, який закінчується стабільним елементом. Сукупність елементів, які утворює такий ланцюжок називається радіоактивним сімейством.

### **Механізм біологічної дії іонізуючого випромінювання**

В даний час існують дві неісключаючі один одного теорії механізму дії іонізуючого випромінювання на організм - прямого і непрямого (опосередкованого) дії випромінювання.

Сутність теорії прямої дії випромінювання зводиться до того, що всі види випромінювання прямо (заражені частинки) або опосередковано (фотонне і нейтронне випромінювання) викликають іонізацію і збудження атомів клітин живого організму. Прихильники прямої дії не можуть пояснити ряд явищ, пов'язаних з опроміненням організму, наприклад невідповідність між дозою опромінення і біологічним ефектом.

Відомо, що поглинена людиною доза в 600 рад викликає його смерть. Чи не означає, що вражаюча дія пояснюється великою величиною поглиненої енергії? Прості обчислення показують, що поглинання енергії іонізуючого

випромінювання, що відповідає смертельній дозі, підвищує температуру людського тіла не більш ніж на 0001 градус Цельсія. Це парадоксально. Так як зміною температури організму на 0001 °С не можна пояснити його смертельний результат. У той же час підраховано, що при абсолютно летальних дозах з десятка мільйонів молекул руйнується одна. Таким чином, безпосередньо нищівну силу стосується вкрай незначного числа атомів і молекул. До того ж викликаються біологічні зміни вкрай невеликі.

Теорія прямої дії іонізуючого випромінювання не може пояснити стійкість клітини до випромінювання при кисневому голодуванні, так званий кисневий ефект

При дії іонізуючого випромінювання на людину в біологічній тканині відбуваються складні фізичні, хімічні та біологічні процеси. Дія іонізуючого випромінювання на біологічну тканину є, мабуть, не прямим. Іонізація і збудження молекул і атомів живої тканини є тільки першим етапом у подальшій ланцюга змін і реакцій.

Сутність теорії іонізуючого дії зводиться до того, що під дією випромінювання в організмі утворюються радикали і окислювачі, що вступають в реакцію з молекулами білка, ферментів і інших життєво важливих речовин. При цьому утворюються радіотоксини, що порушують нормальний цикл біохімічних реакцій і викликають вражаючі дії.

Щоб уявити процеси, пов'язані з утворенням радикалів і окислювачів, розглянемо взаємодію іонізуючого випромінювання з молекулами води, так організм дорослої людини на 75% складається з води. Розглянемо спрощену схему процесу.

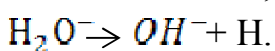
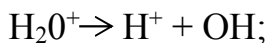
Під дією випромінювання від молекул води відривається електрон і утворюється позитивний іон води:



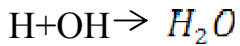
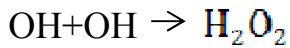
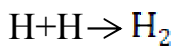
Нейтральна молекула води захоплює цей електрон і утворюється негативний іон води:  $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$

Іони води нестійкі і мимоволі розпадаються з утворенням радикалів

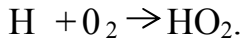
Н і ОН :



Вільні радикали переміщуються в рідкому середовищі і поширюються по всьому організму, при цьому частина вільних радикалів рекомбінуються один з одним:



Крім того, при наявності вільного кисню в тканинах організму утворюється радикал  $\text{H}_2\text{O}$  по реакції::



Уникли рекомбінації вільні радикали і утворилися окислювачі взаємодіють з речовинами рідкого середовища організму. У результаті такої взаємодії відбувається порушення біохімічних процесів в організмі або окремих його тканинах, що призводить до зміни біострумів мозку, ураження клітин кісткового мозку, утворення радіотоксінів, зміни складу крові і т.д.

Узгоджена діяльність клітин живої тканини порушується. При тривалому опроміненні організму поступово розвивається променева хвороба. При великих одноразових дозах променева хвороба прогресивно розвивається.

Дослідження показали, що при опроміненні організму його клітини деградують і гинуть, процес природного поділу клітин порушується що призводить до різних структурних змін. В деяких генах, що визначають спадкові властивості організму і його клітин, відбуваються порушення, які особливо в клітинах статевих залоз впливають на спадковість. Опромінення призводить також до загибелі і пошкодження соматичних клітин. Якщо такі клітини не гинуть, а залишаються життєздатними, то вони стають, по видимому, родоначальниками злоякісних клітин.

Якщо підсумувати сказане, то механізм біологічної дії в сучасному уявленні поетапно можна представити наступною схемою:

- 1) поглинання енергії випромінювання клітинами і тканинами організму;
- 2) утворення вільних радикалів і окислювачів;
- 3) порушення біохімічних процесів;
- 4) порушення фізіологічних процесів;
- 5) Хвороба.

## 95.Дозиметричні величини

**Експозиційна доза**  $D_{екс}$  - це відношення сумарного заряду  $dQ$  всіх іонів одного знаку, створених у елементарному об'ємі повітря, до маси повітря цього об'єму.

$$D_{екс.} = \frac{dQ}{dm}; \left[ D_{екс.} = 1 \frac{Кл}{кг} \right]$$

Позасистемною одиницею є 1 рентген 1Р. Рентген визначається за електричним зарядом віднесеним до 1 см<sup>3</sup> (0,001293г) атмосферного повітря, коли створюються іони, що несуть одну електростатичну одиницю заряду кожного знаку.

$$1Р = 2,58 \cdot 10^{-4} Кл/кг \text{ (або } 1 Кл/кг = 3,88 \cdot 10^3 Р)$$

**Поглинута доза** випромінювання  $D_{погл.}$  - середня енергія  $dE$ , що передається випромінюванням речовині одиничної маси.

$$D = \frac{\langle dE \rangle}{dm}; \quad [D] = 1 Гр (грей) = 1 \frac{Дж}{кг}$$

Позасистемна одиниця 1 Рад: 1 рад = 100 ерг./г; 1 Гр = 100 рад. **Енергетичний еквівалент рентгена** - 1 рад = 1,14Р.

Поглинута енергія у воді та біологічній тканині відрізняється на 4-10% від поглинutoї енергії у повітрі. З біологічної точки зору дія різних видів іонізуючого випромінювання не однакова. Важлива не тільки кількість іонів, утворених в одиниці біологічної маси, але і те, як розподілені іони по довжині шляху. Приймаючи це до уваги, була запропонована спеціальна одиниця поглинutoї дози - бер (біологічний еквівалент рада), яка визначається як поглинута доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, що володіє тією ж біологічною ефективністю, що і 1 рад фотонного випромінювання із середньою питомою іонізацією 100 пар іонів на 1 мкм шару води.

Чим вища лінійна густина іонізації, тим більша ушкоджуюча дія випромінювання при одній і тій самій кількості енергії іонізуючого випромінювання, поглинutoї в одиниці маси тканини. Міжнародна комісія по радіаційним одиницям та вимірюванням рекомендувала спеціальні коефіцієнти відносної біологічної ефективності ( $KBBE$ ).

$$KBBE = \frac{D_0}{D},$$

$D_0$  - поглинута доза зразкового випромінювання,

$D$  - поглинута доза даного випромінювання

Для розрахунку протирадіаційного захисту використовується не конкретне значення  $KBBE$ , а так званий коефіцієнт якості випромінювання  $Q$ . Числові значення  $Q$ :

для фотонного випромінювання, бета-випромінювання -  $Q=1$ .

для нейтронів, енергія  $E < 20\text{KeV}$  -  $Q=3$ .

для нейтронів енергія  $E=0,1 - 10\text{MeV}$ , протонів  $E < 10\text{MeV}$  -  $Q=10$ .

для альфа-випромінювання,  $E < 10\text{MeV}$ , для тяжких ядер віддачі -  $Q=20$ .

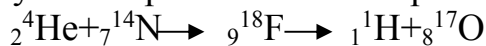
Еквівалентна доза випромінювання  $D_{\text{екв}} = D_{\text{погл}} \cdot Q$ ;  $[D_{\text{екв.}}] = 1\text{Зв}(\text{зіверт})$ ;  $1\text{бер} = 10^{-2}\text{Зв}$ .

Ушкоджуюча дія іонізуючого випромінювання на організм людини залежить не тільки від одержаної дози, але і від часу, за який вона була одержана, тому важливою характеристикою є потужність відповідної дози.

## 96. Ядерні реакції

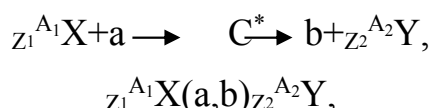
Частинки, рухаючись в речовині, взаємодіють з її атомами, тобто з ядрами і електронами. Характер ядерної взаємодії визначається видом частинки, її енергією, властивостями речовини і умовами взаємодії. Зокрема, зіткнення частинок з ядром викликає різні ядерні реакції, в результаті яких відбувається зміна заряду чи маси частинки або випускаються  $\gamma$ -кванти.

Типовим прикладом ядерної реакції є процес взаємодії швидких  $\alpha$ -частинок з ядрами азоту, при якому спостерігається виліт протонів:



Вперше ядерну реакцію такого типу здійснив Резерфорд в 1919 р. Кількість відомих нині ядерних реакцій сягає уже тисяч.

Ядерні реакції записують у вигляді рівняння



де  $\text{C}^*$  - проміжне ядро у збудженому стані.

Тип ядерної реакції визначається видом взаємодіючої і виділеної частинок (a,b). Якщо вони збігаються (a,a), реакцію називають розсіянням частинки a. У такому разі склад ядер не змінюється. Якщо в ядерній реакції частинка a зникає (поглинається ядром), а замість неї появляється нова частинка b, склад ядра змінюється: відбувається ядерне перетворення.

За механізмом взаємодії ядерні реакції можна поділити на два види:

- прямі ядерні реакції;
- реакції з утворенням проміжного ядра.

Прямі ядерні реакції відбуваються при дуже високій енергії частинок і за дуже короткий час, необхідний для того, щоб частинка пролетіла через ядро ( $10^{-23}$ - $10^{-21}$  с). Наприклад, швидкий протон може вибити з поверхні ядра один з нуклонів і полетіти разом з ним.

Більшість же ядерних реакцій з кінетичною енергією частинок  $< 10\text{MeV}$  проходить з утворенням проміжного ядра.

Ядерну реакцію, що приводить до утворення проміжного ядра, називають вхідним каналом ядерної реакції, а кожний окремий вид розпаду проміжного ядра – вихідним каналом.

Здійснення того чи іншого виду вихідного каналу залежить від енергії збудження проміжного ядра  $E^*$ . Якщо енергія збудження перевищує енергію зв'язку  ${}_2^4\text{He}$ -частинки або дейтрона  ${}_1^2\text{H}$ , проміжне ядро може перейти в основний стан, випустивши одну з цих частинок. Якщо ж  $E^*$  менша від енергії цих частинок, то перехід в основний стан відбувається через випускання одного або декількох  $\gamma$ -квантів.

Під час ядерної реакції зберігається загальна кількість нуклонів і сумарний заряд, а відбувається лише перерозподіл нуклонів і заряду між ядрами та частинками. Збереження заряду і кількості нуклонів дає змогу якісно визначити можливі напрямки перебігу ядерної реакції.



Ядерні реакції супроводжуються зміною кінетичної енергії взаємодіючих частинок. Для ядерних реакцій виконуються закони збереження енергії і імпульсу.

Запишемо баланс енергії в реакції  ${}_{Z_1}^{A_1}X(a,b){}_{Z_2}^{A_2}Y$ , враховуючи, що повна енергія ядра і частинок дорівнює сумі енергій спокою  $mc^2$  і кінетичної енергії:

$$M_X c^2 + m_a c^2 + E_X + E_a = m_Y c^2 + m_b c^2 + E_Y + E_b.$$

З цього рівняння можна визначити енергію ядерної реакції (або тепловий ефект  $Q$ ) як зміну кінетичної енергії процесів реакції:

$$Q = (E_Y + E_b) - (E_X + E_a) = [(m_X + m_a) - (m_Y + m_b)]c^2 = \Delta mc^2.$$

Якщо масу вимірювати в а.о.м., то  $Q = 931 \Delta m$  MeV.

Залежно від зміни маси ядер і частинок, що беруть участь в реакції,  $Q$  може набувати значення  $Q > 0$ ,  $Q \leq 0$ .

Реакції з  $Q > 0$  називають екзоенергетичними (екзотермічними). В цьому випадку частина енергії спокою вихідного ядра  $X$  і взаємодіючої частинки  $a$  перетворюються в кінетичну енергію продуктів реакції, при цьому маса останніх зменшується. Прикладом такої реакції є

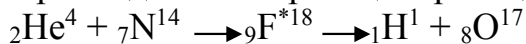


Екзоенергетичні реакції можуть відбуватись при нульовій кінетичній енергії взаємодіючих частинок, якщо їх наближенню не заважають кулонівські сили відштовхування:



Реакції з від'ємними значеннями  $Q$  називають ендоенергетичними (ендотермічними).

Прикладом такої реакції є реакції вигляду



$$(Q = -5,5 \text{ MeV})$$

Ядерні реакції класифікуються за такими ознаками:

1) за родом частинок, що беруть в них участь:

- реакції під дією нейтронів;
- реакції під дією заряджених частинок;
- реакції під дією  $\gamma$ -квантів;

2) за енергією частинок, що їх викликають:

- реакції при малих енергіях ( $= 1$  eV), що проходять за участю нейтронів;
- реакції при середніх енергіях (до 10 MeV), що проходять за участю  $\gamma$ -квантів і заряджених частинок ( ${}_1^1\text{H}$ ,  ${}_2^4\text{He}$ );
- реакції при високих енергіях 10-100 MeV, які приводять до народження елементарних частинок, що відсутні у вільному стані;

3) за родом ядер, що беруть участь в реакції:

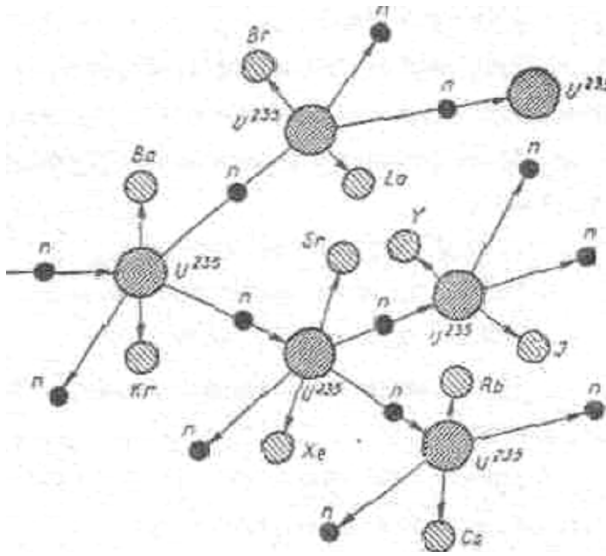
- реакції на легких ядрах ( $A < 50$ );
- реакції на середніх ядрах ( $50 < A < 100$ );
- реакції на важких ядрах ( $A > 100$ );

4) за характером ядерних перетворень, що відбуваються:

- реакції з випусканням нейтронів;

- реакції з випусканням заряджених частинок;
- реакції захоплення (під час цих реакцій складове ядро переходить в основний стан, випромінюючи один або кілька  $\gamma$ -квантів).

## 97. Реакція ядерного поділу. Ланцюгова реакція поділу. Ядерний реактор

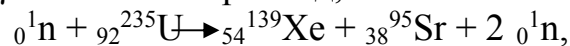


До початку 40-х років роботами багатьох учених було доведено, що під час опромінення урану нейтронами утворюються елементи із середини періодичної системи - лантан і барій. Цей результат поклав початок дослідженню ядерних реакцій нового типу - реакцій поділу ядра, суть яких в тому, що важке ядро під дією нейтронів, а також інших частинок ділиться на декілька більш легких ядер, найчастіше на два близькі за масою ядра.

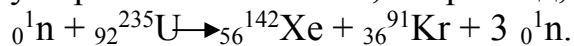
Рис. 194

Особливістю

поділу ядра є те, що він супроводжується випусканням двох – трьох вторинних нейтронів, які називаються нейтронами поділу. Уламки радіоактивні, вони можуть пройти ряд  $\beta$ -перетворень, що супроводжуються випромінюванням  $\gamma$ -квантів. Наприклад,



Уламки поділу можуть бути різними. Можлива, наприклад, і реакція



Більшість нейтронів при поділі випускаються практично миттєво ( $t \leq 10^{-14}\text{c}$ ), а частина (близько 0,7%) випускаються уламками поділу через деякий час після поділу ( $0,05\text{c} \leq t \leq 60\text{c}$ ). Перші з них називаються миттєвими, другі - такими, що запізнюються. Загалом на кожний акт поділу припадає 2,5 випущеного нейтрона. Вони мають порівняно широкий енергетичний спектр в межах від 0 до 7 MeV, на один нейтрон в середньому припадає енергія близько 2 MeV.

Розрахунки показують, що поділ ядер повинен супроводжуватися виділенням великої кількості енергії, яку можна обчислити за дефектом маси ядерної реакції:

$$E = \Delta m \cdot 931 \text{ MeV} = 200 \text{ MeV}.$$

Ця енергія розподіляється так: кінетична енергія уламків (=166 MeV), кінетична енергія нейтронів поділу (= 10 MeV), енергія  $\gamma$ -випромінювання (=15 MeV), енергія антинейтрино (=10 MeV).

Нейтрони, що мають енергію активації (мінімальну енергію, необхідну для здійснення реакції поділу ядра) близько 1 MeV, викликають поділ ядра урану  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , торію  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ , протактинію  ${}_{91}^{231}\text{Pa}$  і плутонію  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ .

Тепловими нейтронами діляться ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  ${}_{90}^{230}\text{Th}$ . Два останні ізотопи в природі не зустрічаються, їх отримують штучно.

Для практичного застосування поділу важких ядер найважливіше значення має виділення великої енергії при кожному акті поділу і поява при цьому 2 – 3 нейтронів. Кожен з цих нейтронів взаємодіє з сусідніми ядрами речовини, що, у свою чергу, спричиняє в них

реакцію поділу, тобто відбувається лавиноподібне зростання кількості актів поділу. Така реалія поділу називається ланцюговою. Схематично ланцюгова реакція поділу ядер зображена на рис. 194.

Ланцюгова реакція поділу характеризується коефіцієнтом розмноження  $k$  нейтронів, який дорівнює відношенню кількості нейтронів у даному поколінні до їх кількості в попередньому поколінні. Необхідною умовою для розвитку ланцюгової реакції поділу є вимога  $k \geq 1$ .

Виявляється, що не всі вторинні нейтрони, які утворюються, викликають наступний поділ ядер, що приводить до зменшення  $k$ . По-перше, внаслідок скінченних розмірів активної зони (простір, де відбувається ланцюгова реакція) і великої проникної здатності нейтронів, частина з них покине активну зону раніше ніж буде захоплена яким-небудь ядром. По-друге, частина нейтронів захоплюється ядрами домішок, що не діляться і які завжди присутні в активній зоні.

Коефіцієнт розмноження залежить від природи речовини, що ділиться, а для даного ізотопу — від його кількості, а також від розмірів і форми активної зони.

Мінімальні розміри активної зони, при яких можливе здійснення ланцюгової реакції, називають критичними розмірами. Мінімальна маса речовини, що ділиться, яка необхідна для здійснення ланцюгової реакції, називається критичною масою. Для зменшення втрат нейтронів і критичних параметрів речовини її оточують відбивачем — шаром неподільної речовини, яка має малий ефективний поперечний переріз для захоплення нейтронів і великий переріз для їх розсіяння.

При  $k > 1$  відбувається наростаюча реакція, кількість поділів безперервно зростає, і реакція може стати вибуховою.

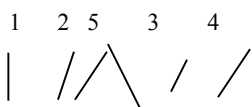
При  $k = 1$  відбувається самопідтримуюча реакція, при якій кількість нейтронів з часом не змінюється.

При  $k < 1$  відбувається згасаюча реакція.

Ланцюгові реакції діляться на керуючі і некеровані. Вибух атомної бомби є некерованою реакцією.

Велике значення в ядерній енергетиці має не лише здійснення ланцюгової реакції поділу, але і керування нею. Пристрій, в якому здійснюється і підтримується керована ланцюгова реакція поділу, називається ядерним реактором.

Розглянемо типову схему реактора на теплових нейтронах (рис. 195). В активній зоні реактора розміщені тепловиділяючі елементи 1 і сповільнювачі 2, в яких нейтрони сповільнюються до теплових швидкостей. Тепловиділяючі елементи (твели) - це блоки з радіоактивного матеріалу, що знаходяться в герметичній оболонці, яка слабо поглинає нейтрони. За рахунок енергії, що виділяється при поділі ядер, твели розігріваються, а тому для охолодження їх поміщають в потік теплоносія (3 - канал для протікання теплоносія). Активна зона оточується тепловідбивачем 4, що зменшує витік нейтронів.



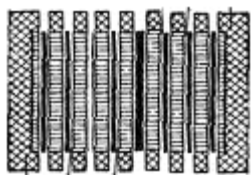


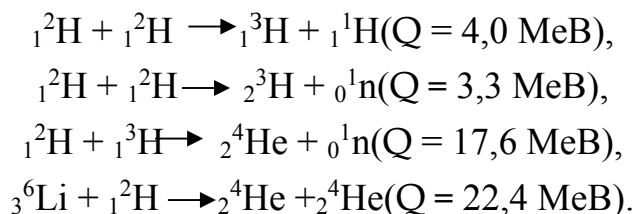
Рис.195

Керування ланцюговою реакцією здійснюється спеціальними керуючими стрижнями з матеріалів, що сильно поглинають нейтрони. При повністю вставлених стрижнях реакція не відбувається. При поступовому вийманні стрижнів  $k$  росте і при певному положенні доходить до одиниці. В цей момент реактор починає працювати. В міру його роботи кількість матеріалу, який ділиться, в активній зоні зменшується і відбувається її забруднення осколками поділу. Щоб реакція не припинилась, з активної зони за допомогою автоматичного пристрою поступово виймаються керуючі стрижні. В реакторі є аварійні стрижні, введення яких при збільшенні інтенсивності реакції зразу її припиняє. Довільний реактор має біологічний захист – систему екранів із захисних матеріалів.

## 98. Реакція синтезу атомних ядер.

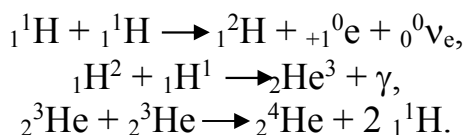
### Проблема керованих термоядерних реакцій

Ядерний синтез, тобто злиття легких ядер в одне ядро супроводжується, як і поділ важких ядер, виділенням великих кількостей енергії. Оскільки для синтезу ядер необхідні дуже високі температури, цей процес називається термоядерною реакцією. Питома енергія зв'язку ядер різко збільшується при переході від ядер важкого водню ( ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ ) до літію  ${}^6_3\text{Li}$  і особливо до гелію  ${}^4_2\text{He}$ , тобто реакції синтезу легких ядер в більш важкі повинні супроводжуватись виділенням великої кількості енергії, що підтверджується розрахунками. Як приклади розглянемо реакції синтезу:

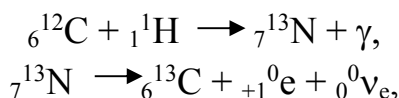


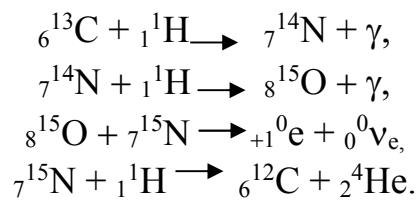
Реакції синтезу атомних ядер мають ту особливість, що в них енергія, яка виділяється на один нуклон, значно більша, ніж в реакціях поділу важких ядер. Термоядерні реакції є, можливо, одним з джерел енергії Сонця і зірок. В принципі висловлено два припущення про можливі способи перебігу термоядерних реакцій на Сонці:

1) протонно-протонний або водневий цикл, характерний для температур  $\sim 10^7$  К:



2) вуглецево-азотний або вуглецевий цикл, характерний для більш високих температур ( $\sim 2 \cdot 10^7$  К)





В результаті цього циклу 4 протони перетворюються в ядро гелію і виділяється енергія, яка дорівнює 26,7 МеВ. Ядра ж вуглецю, кількість яких залишається незмінною, беруть участь у реакції в ролі каталізатора.

З наведених вище рівнянь реакції видно, що синтез протонів супроводжується виникненням нейтрино, кількість яких можна оцінити. Однак проведені вимірювання показали, що кількість нейтрино, що виділяються на Сонці, дуже мала. В зв'язку з цим питання про природу сонячної енергії залишається дискусійним.

Теоретичною основою для перебігу штучних керованих термоядерних реакцій є реакції типу  ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ , що відбуваються у високотемпературній плазмі. Однак завдання полягає не тільки в створенні умов, потрібних для інтенсивного виділення енергії в термоядерних процесах, а здебільшого в підтриманні цих умов. Для здійснення самопідтримної термоядерної реакції потрібно, щоб швидкість виділення енергії в системі, де відбувається реакція, була не менша за швидкість відведення енергії від системи.

Розрахунки показують, що для забезпечення самопідтримної керованої термоядерної реакції температуру дейтерієвої плазми треба довести до кількох сотень мільйонів градусів. При температурах  $\sim 10^8$  К реакція має повну інтенсивність і супроводжується виділенням великої енергії.

Основним питанням, розв'язання якого дозволить здійснити керовані термоядерні реакції, є з'ясування умов, за яких високотемпературна плазма в магнітному полі належної конфігурації може зберегти стійкість. Розв'язання цього питання поряд з пошуками шляхів підвищення температури плазми є головним напрямом, в якому розвиваються дослідження керованих термоядерних реакцій.

Можливість реалізації термоядерної реакції зводиться до необхідності виконання двох вимог: наявності деякої мінімальної температури і певного обмеження для добутку  $n\tau$ : критерій Лоусона

$$n\tau > 10^{16} \text{ с/см}^3, T > 10^9 \text{ К} - {}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$$

$$n\tau > 10^{14} \text{ с/см}^3, T > 10^8 \text{ К} - {}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \longrightarrow {}_1^3\text{H} + {}_1^1\text{H}.$$

Тут  $n$  - концентрація речовини у плазмі,  $\tau$  – час утримання речовини у плазмі.