



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. Каразіна
Кафедра прикладної хімії

Основи радіохімії та радіоекології

Теми 1-6

доц. А.П. Краснопорова

2023

Теми 1-6

- Тема 1. Історія радіохімії
- Тема 2. Фізичні основи радіохімії
- Тема 3. Закони радіоактивного розпаду
- Тема 4. Типи ядерних перетворень
- Тема 5. Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною
- Тема 6. Радіаційна хімія

ТЕМА 1

Історія радіохімії

ТЕМА 1

- Історія радіохімії. Відкриття В.К. Рентгена
- Відкриття радіоактивності. Анрі Беккерель
- Відкриття радіоактивності. Марія і Пьер Кюрі
- Відкриття радію та полонію
- Виникнення радіохімії
- Історія розвитку радіохімії (ранній етап)
- Історія розвитку радіохімії (сучасний етап)
- Предмет радіохімії
- Особливості радіохімії
- Значення радіохімії
- Основні розділи радіохімії

Історія радіохімії.

Відкриття В.К. Рентгена

Вчиним, який зробив перший крок до початку атомної ери був німецький фізик Конрад Вільгельм Рентген.

В 1895 р. Рентген оголосив про відкриття невідомого випромінювання.

К.В. Рентген виявив, що при проходженні струму високої напруги через газорозрядну трубку починав світитися лежачий на столі екран, покритий тонким шаром платино-ціаністого барію.

Між трубкою і екраном Рентген поміщав різні предмети: книгу, дошку, листи паперу, навіть руку. Невідомі промені легко проходили через ці предмети.

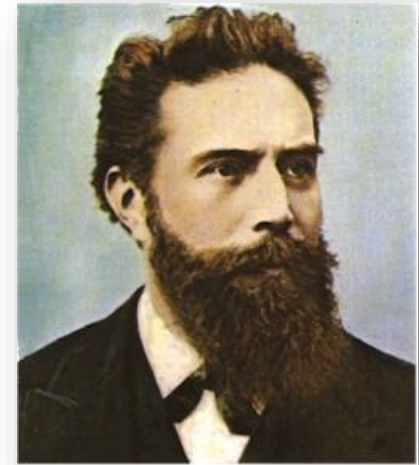
Коли на шляху променів виявилася рука вченого, на світловому екрані він побачив силует кісток своєї руки.

Фотоматеріали, упаковані в світлонепроникний папір, що лежали неподалік від електронної трубки, виявилися засвіченими.

Рентген назвав це випромінювання Х-променями, які згодом стали називати рентгенівськими.

У 1901р. В.К. Рентген став першим лауреатом Нобелівської премії з фізики.

За цим геніальним відкриттям пішов ряд не менш важливих відкриттів.



В.К. РЕНТГЕН



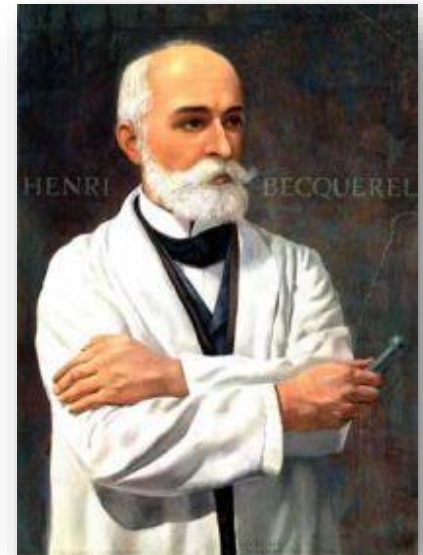
Відкриття радіоактивності.

Анрі Беккерель

Під впливом досліджень Рентгена у французького фізика Антуана Анрі Беккереля виникла гіпотеза, яка призвела до відкриття радіоактивності.

Оскільки при генерації Х-променів спостерігалася фосфоресценція скляних стінок рентгенівської трубки, А. Беккерель припустив, що будь-яке фосфоресцентне світіння супроводжується випусканням рентгенівського випромінювання.

Для перевірки цього припущення він помістив різні фосфоресційні речовини на загорнуті в чорний папір фотопластинки і отримав несподіваний результат: засвіченою виявилася єдина платівка, з якою стикався кристал солі урану.



Антуан Анрі
БЕККЕРЕЛЬ

Відкриття радіоактивності. Марія і Пьер Кюрі

Навесні 1896 р. А.Беккерель зробив ряд повідомлень про виявлення ним нового виду випромінювання (згодом назване радіоактивним), яке випускається солями урану.

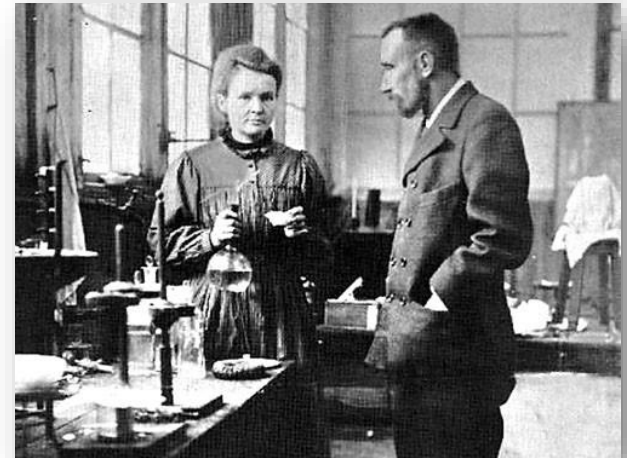
Численні контрольні досліді показали, що причиною засвічення фотопластини стала не фосфоресценція, а особлива властивість урану, в якій би хімічній сполукі він не знаходився, випускати невидимі «промені Беккереля».

Крім того, що це проміння засвічувало фотографічні пластини, вони іонізували газ, через який проходив

У 1898 р. Марія Склодовська-Кюрі та П'єр Кюрі виявили, що джерелом променів Беккереля може бути не тільки уран, а й торій.

М.Кюрі вводить новий термін «радіоактивність» як мимовільний процес, що відбувається в атомах хімічного елемента з випромінюванням.

За відкриття явища радіоактивності А.Беккерель, М. та П. Кюрі були удостоєні у 1903 р. Нобелівської премії з фізики.



Марія і Пьер Кюрі
в лабораторії

Відкриття радію та полонію

Започаткований П'єром і Марією Кюрі систематичний пошук нових радіоактивних речовин і вивчення властивостей їхнього випромінювання підтвердили здогад А. Беккереля про те, що радіоактивність уранових сполук пропорційна числу атомів урану, що містяться в них.

Серед обстежених мінералів цю закономірність порушувала лише уранова смоляна руда (уранініт), яка виявилася вчетверо активнішою, ніж відповідна кількість чистого урану.

Кюрі зробили висновок про те, що в уранініт повинен міститися невідомий високоактивний елемент.

Відкриття радію та полонію

Для отримання нових елементів, що містяться в руді, було розроблено новий радіохімічний метод носіїв, що полягає в тому, що мікрокількості цих елементів співсаджувалися з ваговою кількістю осадів – носіїв (сполуки подібних стабільних елементів).

Переробивши кілька тонн уранової руди, і використовуючи як носії солі вісмута і барію, вони отримали два радіоактивні осади: гідроокису вісмуту і сірчаноокислого барію.

У першому осаді було виявлено раніше невідомий елемент.

Після того, як була доведена його хімічна індивідуальність, він був названий на честь батьківщини Марії Кюрі полонієм.

У сірчаноокислому барії було знайдено другий новий хімічний елемент, аналог лужноземельних металів.

За колосальну (в два мільйони разів більшу, ніж у урану) активність і величезну проникаючу здатність його променів, новий елемент подружжя Кюрі назвали радієм від латинського слова "radius" – промінь.

Виникнення радіохімії

У 1911р. М. Склодовська-Кюрі «за відкриття радію та полонію, отримання радію в металевому стані та здійснення експериментів пов'язаних з радієм» була удостоєна другої Нобелівської премії з хімії.

По мірі вивчення явища радіоактивності та властивостей радіоактивних речовин чітко почали вимальовуватися два тісно взаємодіючі напрямки досліджень у цій галузі.

Один – чисто фізичний напрям, вивчав природу і властивості радіоактивності, закони радіоактивних перетворень тощо. розвиток цього напрямку призвело до виникнення ядерної фізики.

Другий напрямок спочатку ставив своїм основним завданням дослідження хімічної природи радіоактивних речовин та продуктів їх перетворень. Розвиток цього напрямку спричинив виникнення радіохімії.

Історія розвитку радіохімії (ранній етап)

В історії розвитку радіохімії можна виділити два періоди: ранній (1898-1933 р.) і сучасний (з 1934 р. і по теперішній час).

Ранній період характеризується:

- виникненням та становленням радіохімії як науки, відкриттям природних радіоактивних елементів та радіоактивних нуклідів (П. Кюрі та М.Склодовська-Кюрі, О. Ган, Л. Мейтнер, Г. А.);
- встановленням закономірностей зміни хімічної природи елементів у результаті радіоактивного розпаду та формулюванням закону зсуву (Ф.Содді та К.Фаянс, 1909–1912);
- відкриттям та вивченням явища ізопоії (Ф. Содді, А. Флек, 1911–1913);
- розміщенням радіоактивних елементів у Періодичній системі (Ф. Содді та К. Фаянс, 1913) та формуванням уявлень про природні радіоактивні ряди;
- відкриттям першої ядерної реакції (Е. Резерфорд, 1919);
- вивченням поведінки радіоактивних елементів, що знаходяться в субмікрокількості, в різних фізико-хімічних процесах (К. Фаянс, П. Бер, Ф.Панет, А.П. Ратнер, Т. Сведберг, О. Ган, В. Хлоін та ін, 1913-1926);
- відкриттям нейтрона (Дж. Чедвік, 1932);
- розробкою термодинамічної теорії ізоморфної сокристалізації та адсорбції радіоактивних елементів (А.П. Ратнер, 1933).

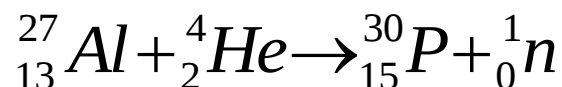
Історія розвитку радіохімії (сучасний етап)

Сучасний період розвитку радіохімії розпочався з 1934 р.

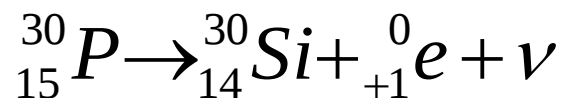
Піддаючи бомбардування альфа-частинками (джерело альфа-частинок-полоній) бор і алюміній, Ірен Кюрі і Ф. Жоліо-Кюрі вивчали вихід позитронів (позитивно заряджених частинок, які у всіх інших відносинах нагадують негативно заряджені електрони).

Пізніше І. та Ф. Жоліо–Кюрі дійшли переконання, що частина алюмінію та бору в аналізованих зразках перетворилася на нові хімічні елементи.

Більше того, ці нові елементи були радіоактивними: поглинаючи 2 протони та 2 нейтрони альфа-частинок, алюміній перетворився на радіоактивний фосфор, а бір – на радіоактивний ізотоп азоту:



Штучно отриманий ізотоп фосфору виявився радіоактивним; його ядро розпадається з випромінюванням позитрону ${}^+e$ і нейтрино:



Предмет радіохімії

Термін «радіохімія» був вперше введений англійським хіміком А. Камероном в 1910р.

Камерон визначав радіохімію як розділ науки, який вивчає природу і властивості радіоактивних елементів і продуктів їх розпаду.

Сучасне визначення радіохімії:

«Радіохімія – область хімії, що вивчає хімію радіоактивних ізотопів, елементів і речовин, їх фізико-хімічні властивості, ядерні перетворення і супутні їм фізико-хімічні процеси».

Особливості радіохімії

- Характерні особливості радіохімії, що відрізняють її від інших розділів хімії, випливають із загальної властивості всіх об'єктів її вивчення - радіоактивності.
- Ця властивість робить непридатним одне з фундаментальних положень класичної хімії - незмінність природи хімічного елемента.
- Найбільш важливі аспекти явища радіоактивності, що зумовлюють особливості радіохімії:
 1. Обмеженість часу існування переважної більшості радіоактивних елементів і радіоактивних нуклідів.
 2. Принципово інша природа процесів, які відбуваються у радіоактивних атомах, і зумовлені цим величезні масштаби енергетичних змін
 3. Зміна хімічної природи елемента внаслідок радіоактивних перетворень.
 4. Особливістю радіохімії є необхідність роботи з надзвичайно малими кількостями радіоактивних речовин.
 5. Характерною особливістю радіохімії є те, що вона вивчає стани та закони поведінки ультрамалих кількостей речовини та має власні методи.

Значення радіохімії

Значення радіохімії, як і будь-який науки, визначається впливом, який вона зробила і робить на науково-технічний прогрес.

Перш за все, радіохімія зіграла величезну роль в розробці теоретичних і експериментальних основ ядерної промисловості.

На основі радіохімічних досліджень зроблений цілий ряд відкриттів, таких як природна радіоактивність, перетворюваність елементів, ядерна ізомерія, ізотопія, штучна радіоактивність і ділення важких ядер.

Значна роль належить радіохімії у відкритті та отриманні нових елементів.

Основні розділи радіохімії

1. Загальна радіохімія.
2. Ядерна хімія. Хімія ядерних перетворень.
3. Хімія радіоактивних елементів.
4. Прикладна радіохімія.
5. Радіаційна хімія.

1. Загальна радіохімія вивчає фізико-хімічні закономірності поведінки радіоактивних ізотопів і елементів.

До цього розділу радіохімії відноситься вивчення стану радіоактивних ізотопів в ультрамалих концентраціях в розчині, газі та твердій фазі, розподіл їх між фазами в процесах співосадження, адсорбції, іонного і ізотопного обміну, електрохімія радіоактивних елементів.

2. Ядерна хімія (Хімія ядерних перетворень) вивчає продукти ядерних перетворень і ядерних реакцій.
3. Хімія радіоактивних елементів- це хімія радіоактивних елементів, починаючи з технецію, прометія, полонію, закінчуючи новими синтезованими елементами
4. Прикладна радіохімія включає хімію ядерного пального, радіохімію АЕС, отримання природних і штучних активних елементів, ізотопів, і синтез мічених ними сполук, застосування радіоактивних нуклідів в науці і промисловості в якості радіоактивних індикаторів і в приладах неруйнівного контролю, екологічних проблем.
5. Радіаційна хімія вивчає хімічні перетворення в системах при впливі на них іонізуючого випромінювання.

Радіаційна хімія близько стикається з радіохімії, але не становить предмета останньої.

ТЕМА 2

Фізичні основи радіохімії

Тема 2

- Будова атома
- Протонно-нейтронний склад ядер
- Властивості атомного ядра
- Ізотопи, ізобари, ізотони
- Розиїри ядра
- Енергія зв'язку ядра
- Ядерні сили
- Стійкість ядер
- Радвоактивність
- Ядергі моделі
- Магічні числа ядергої структури

Будова атома

У 1911 р. Ернест Резерфорд виявив існування атомного ядра і обґрунтував планетарну теорію будови атома, згідно з якою, атом складається з дуже маленького позитивно зарядженого ядра і електронів що обертаються навколо ядра і компенсують заряд ядра.

Гіпотеза Резерфорда була підтверджена експериментально Г.В.Гейгером і Е. Марсденом з розсіювання альфа-частинок при проходженні через різні речовини.

У 1913 р. Нільс Бор висунув квантову теорію будови електронних оболонок атомів.

У 1920 р. Резерфорд висловив припущення, що повинна існувати частинка з масою, що дорівнює масі протона, але не має електричного заряду. Однак, виявити таку частку Резерфорда не вдалося.

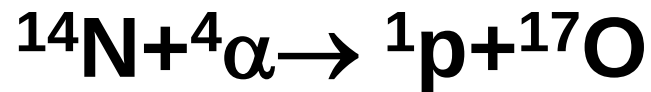
У 1932 р. англійський фізик Дж. Чедвік висунув гіпотезу про існування нейтральних частинок, близьких за розмірами і масою до протонів. Ці частинки він назвав нейтронами.

Протонно-нейтронний склад ядер

У 1913 р Е. Резерфорд висунув гіпотезу про те, що однією з частинок, що входять в ядро атома будь-якого хімічного елемента має бути ядро атома водню, так як відомо, що маси атомів хімічних елементів перевищують масу атома водню в ціле число раз.

Резерфорд провів дослідження по взаємодії альфа-частинок з ядрами атома азоту.

В результаті взаємодії з ядра атома азоту вилітала частка, яку Резерфорд назвав протоном і припустив, що це ядро атома водню.



У 1920 р Резерфорд висловив припущення, що повинна існувати частка масою, рівній масі протона, але не має електричного заряду. Однак, виявити таку частку Резерфорда не вдалося.

У 1932 р англійський фізик Дж. Чедвік висунув гіпотезу про існування нейтральних частинок, близьких за розмірами і масою до протонів. Ці частинки він назвав нейтронами.

Протонно-нейтронний склад ядер

У 1932р. радянський фізик-теоретик Д.Д. Іваненко вперше висловив припущення, що атомні ядра всіх хімічних елементів мають складну будову і складаються з елементарних частинок двох типів: ядерних протонів і ядерних нейтронів.

Разом протони і нейтрони атомного ядра називають нуклонами (тобто ядерні частинки nucleus).

$$m_n = 1.00866 \text{ а.о.м.} = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1838 \text{ т.е.}$$

$$m_p = 1.00782 \text{ а.о.м.} = 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836 \text{ т.е.}$$

1 а.о.м.(атомна одиниця маси) дорівнює 1/12 маси ізотопу вуглецю-12 і складає $[(1.66035 \pm 0.0003) \cdot 10^{-27} \text{ кг}]$

- Протон – стабільна частка – являє собою ядро атома водню і не змінює своїх властивостей в часі.
- Нейтрон – поза ядра не стабільний і мимоволі перетворюється в протон, електрон і антинейтрино з періодом напіврозпаду 12.5 хв:



Властивості атомного ядра

- Заряд, число нуклонів і маса ядра
- Заряд атомного ядра дорівнює кількості протонів в ядрі, яке збігається з порядковим номером елемента (Z) в таблиці Менделєєва.
- Масове число A дорівнює сумі протонів і нейтронів в ядрі:

$$A = (\Sigma p + \Sigma n)$$

Маса атомного ядра, виражена в одиницях маси, дуже мала і її зазвичай висловлюють в інших одиницях.

У ядерній фізиці за одну атомну одиницю маси (а.е.м.) прийнята 1/12 частина маси нейтрального ізотопу вуглецю ^{12}C рівній 12,000000 а.о.м

Точні значення атомних мас визначаються експериментально за допомогою мас-спектрометрической техніки.

Відповідно до рівняння Ейнштейна маса еквівалентна енергії:

$$E = mc^2$$

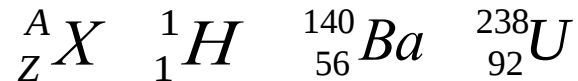
Тому масу ядра можна визначити замість атомних одиниць маси в одиниці енергії, приймаючи, що

$$1 \text{ а.о.м.} = 1.4923 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931.5 \text{ МэВ}$$

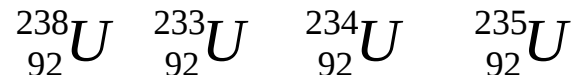
Ізотопи, ізобари, ізотони

Різновид атомів, ядра яких мають певне число нуклонів (протонів і нейтронів), називається нуклідами.

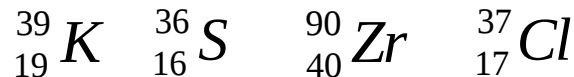
- Символічний запис нуклідів включає хімічний символ ядра X і індекси зліва в низу " Z " (число протонів в ядрі) і " A " зліва вгорі - повне число нуклонів. наприклад,



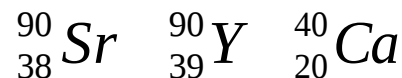
- Ізотопними нуклідами (ізотопами) називаються нукліди, що мають однакове число протонів. Вони розрізняються тільки числом нейтронів. Тому всі ізотопи належать одному і тому ж хімічному елементу. Так, наприклад, ізотопи урану:



- Ізотонними нуклідами (Ізотон) називають нукліди з однаковим числом нейтронів і різним числом протонів. Приклади Ізотон які відносяться до різних нуклідів:



- Ізобарами називають різновид нуклідів, ядра яких мають різне число і протонів і нейтронів, але мають однакове число нуклонів. Приклад ізобарах:



Розміри ядра

РАДІУС ЯДРА

Під радіусом ядра розуміється така відстань від його центру, на якому крім сил кулонівського відштовхування, починають діяти специфічні ядерні сили, що викликають тяжіння частинки до ядра.

Перший вимір розмірів ядра було виконано Е. Резерфордом в 1911 р. з розсіювання альфа-частинок на ядрах.

Якщо ядро в першому наближенні вважати кулястим, то згідно з експериментальними даними, його радіус

$$R = r_0 \cdot A^{1/3},$$

де A – масове число – число нуклонів в ядрі, r_0 – постійна величина що дорівнює $(1,2-1,5)10^{-15}\text{м}$.

Якщо вважати, що об'єм ядра приблизно дорівнює

$$V \approx R^3,$$

тоді об'єм V пропорційний масового числа – A , отже, щільність ядра є константою $\rho = A / V$, тобто. щільності всіх ядер приблизно однакові.

Це вказує на практичну нестисливість ядерного речовини і щільну упаковку нуклонів в ядрі.

Енергія зв'язку ядра

Відомо, що будь-яка система прагне перейти в стан з найменшим запасом енергії. Цей висновок термодинаміки може бути застосовано і до таких мікроскопічним утворень, як атомні ядра.

Виходячи з цього, сумарна енергія нуклонів, взятих порізно, повинна бути більше енергії ядра, що складається з того ж числа нуклонів.

При порівнянні суми мас нуклонів з масою ядра, виявляється, що остання менше на 0,005-0,01%, тобто маса ядра завжди менше суми мас протонів і нейтронів, що складають це ядро на величину Δ_m :

$$\Delta_m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{я}}$$

Величина Δ_m називається дефектом маси і служить мірою енергії зв'язку ядра, тобто тієї енергії, яка витрачається на взаємозв'язок нуклонів в ядрі.

Тому чим більше виділилася при утворенні ядра енергія, тим міцніше пов'язане ядро.

З іншого боку ця енергія є тією енергією, яку необхідно затратити для того щоб розділити ядро на складові його нуклони.

Цю енергію називають енергією зв'язку ядра:

$$E_{\text{зв}} = \Delta_m c^2, \text{ або } E_{\text{зв.}} = 931,5 \Delta_m \text{ МэВ}, \varepsilon_{\text{ср}} = E_{\text{зв}} / A \text{ МэВ/нуклон}$$

Енергія зв'язку ядра

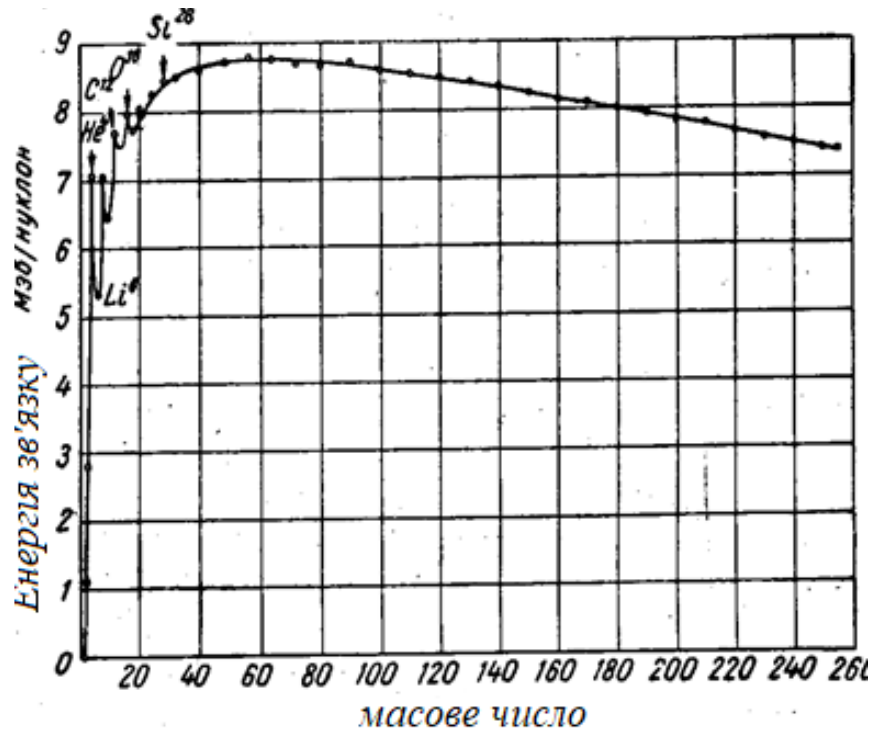


Рис. Залежність енергії зв'язку на нуклон від числа нуклонів в атомних ядрах

- Дослідження кривої енергії зв'язку показує, що атоми елементів, що мають масове число близько 60, мають найбільшу Стабільність, так як при їх утворенні на один нуклон виділяється найбільша кількість енергії.
- Ці ж елементи найбільш поширені в природі.
- Для ядер з дуже великим A енергія зв'язку падає до значення менше 7.5MeV/нуклон.

Ядерні сили

При взаємодії між протонами і нейтронами виявляються особливі сили тяжіння, набагато вищі за величиною кулонівські сили відштовхування.

Ці сили називають ядерними силами і мають ряд особливостей:

1. Ядерні сили дуже великі і діють на дуже коротких відстанях (радіус їх дії обмежений розмірами ядер, 10^{-15}м);
2. Особливістю ядерних сил є їх вибірковість. Вони діють тільки між нуклонами;
3. Кожен нуклон взаємодіє не з усіма нуклонами, що знаходяться в ядрі, а тільки з кількома сусідніми (властивість насичення).

Незважаючи на дуже швидке зростання ядерних сил зі зменшенням відстані, нуклони в ядрі не ущільнені до геометрично можливих меж - ядро проникне

4. Згідно з уявленнями Х. Юкави нуклони утримуються в ядрах короткодійними силами тяжіння, що виникають за рахунок обмінів π -мезонами.



або



Стійкість ядер

Ядерні сили міцно пов'язують в атомному ядрі нуклони між собою, завдяки чому мимовільний розпад ядра на окремі нуклони неможливий.

Однак, якщо ядро (A, Z) представити що складається з таких двох частин (A_1, Z_1) и (A_2, Z_2) :

$$M(A, Z) \rightarrow M_1(A_1, Z_1) + M_2(A_2, Z_2),$$

то розпад ядра на дві частини може бути енергетично вигідним, якщо дотримується нерівність:

$$M(A, Z) > M_1(A_1, Z_1) + M_2(A_2, Z_2) \quad 1$$

Процес розпаду при цьому може відбуватися мимовільно, а весь надлишок маси переходить в енергію розлітаються частин.

Якщо має місце зворотня нерівність

$$M(A, Z) < M_1(A_1, Z_1) + M_2(A_2, Z_2), \quad 2$$

то розпад ядра неможливий.

Тому нерівності типу (1 і 2) називають умовами стійкості ядра по відношенню до розпаду даного виду.

Нейтронно-протонна діаграма стабільних нуклідів

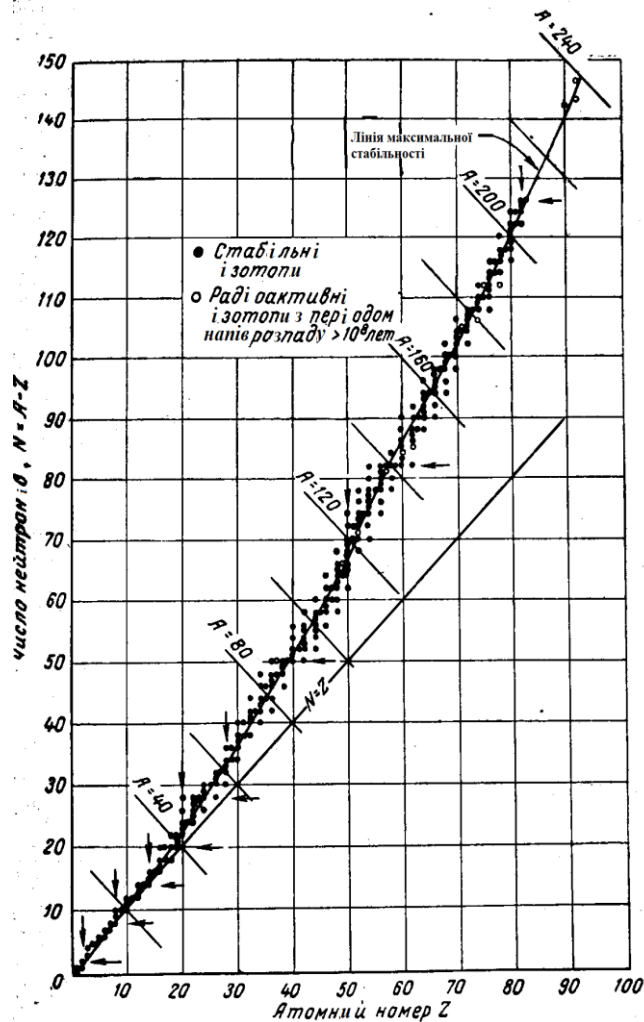


Рис. Нейтронно-протонна діаграма стабільних нуклідів

З рисунка видно, що:

1. Стабільні нукліди розташовуються уздовж вузької доріжки.
2. При малому числі нуклонів стабільними виявляються ядра з $N \approx Z$, що лежать уздовж бісектриси координатного кута.
3. У міру збільшення числа нуклонів доріжка стабільних ядер відходить від цієї бісектриси вліво, тобто стабільними виявляються ядра з $N > Z$. У важких ізотопів відношення N / Z , при якому вони стабільні, досягає 1,6.

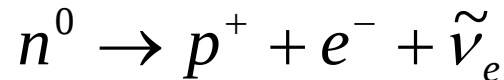
Радіоактивність

У елементів з $Z > 82$ ядерні сили тяжіння вже не здатні забезпечити повну стійкість ядер. Такі ядра прагнуть перейти в стан з меншим запасом енергії. В результаті чого відбуваються процеси їх внутрішньої перебудови.

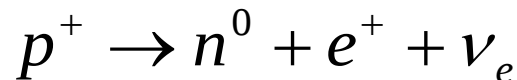
Здатність ядер або їх збуджених станів спонтанно, мимовільно переходити в інші з меншою енергією, випускаючи частки або кванти, називається радіоактивним розпадом, а явище випускання ядрами частинок або гамма - квантів, називається радіоактивністю.

При цьому перехід ядра на більш низький енергетичний рівень з меншим запасом енергії може відбуватися декількома шляхами:

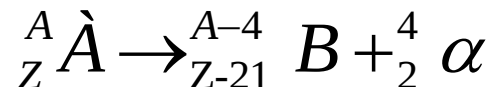
1. Нейтрони переходять в протони з випусканням електрона (бета-розпад) і антинейтрино:



2. Для більш легких ядер перехід в більш стійкий стан ядра може здійснюватися шляхом перетворення протона в нейтрон з випусканням позитрона і нейтрино



3. При нестачі нейтронів, нестійкість ядер визначається кулоновськими силами відштовхування. Перехід в стійкий стан зазвичай реалізується шляхом випускання ядром альфа-частинок, що складаються з двох нейтронів і двох протонів



4. ізомерний перехід. Випускання гамма-квантів. Змінюється тільки енергетичний рівень ядра.

Ядерні моделі

Незважаючи на те, що в даний час існують різні моделі структури атомного ядра, струнка теорія атомного ядра відсутня.

У той же час використовуючи моделі ядра, можна описати деякі властивості атомного ядра, а в окремих випадках навіть кількісно описати їх.

Найбільш важливими моделями є:

- Крапельна модель
- Модель Фермі-газу
- Оболонкова модель

Крапельна модель

У 1936 р Нільс Бор запропонував крапельну (гідродинамічну) модель атомного ядра.

У цій моделі ядро розглядається як сферична крапля зарядженої ядерної рідини, що не стискається.

З рідиною ядерну речовину зближує і властивість насичення ядерних сил (енергія зв'язку ядер приблизно пропорційна масовому числу).

Тут ми зустрічаємося з явищами, що нагадують поверхневий натяг в рідинах.

Всередині ядра щільність приблизно постійна, на межі його діє велика сила, що перешкоджає виходу з нього нуклонів.

Енергію зв'язку нуклонів в атомних ядрах можна порівняти з теплотою випаровування рідин.

За допомогою цієї моделі вдалося пояснити багато властивостей ядра і, в першу чергу, отримати напівемпіричну формулу для енергії зв'язку ядра атома.

Крапельна модель підтверджується також поділом ядер

Найбільш важкі ядра (якщо вони збуджені) можуть ділитися на дві частини, звільняючи при цьому велику кількість енергії.

При цьому ядра діляться не на дві рівні частини і не всі розщеплюються однаковим чином.

Модель Фермі-газу

Відповідно до цієї моделі ядро уподібнюється розрідженому газу, укладеним в певному обсязі.

Модель Фермі-газу дає можливість зрозуміти деякі загальні закономірності ядерної структури і перш за все той факт, що нуклони в ядрі рухаються.

Цей рух спостерігалось в численних дослідках по вивченню взаємодії налітають частинок з нуклонами ядра.

Оболонкова модель

Експериментальним шляхом доведено, що зі збільшенням числа нуклонів в ядрах, важливі властивості атомних ядер (дефект маси, стабільність, поширеність в природі, енергія зв'язку та ін.) періодично змінюються.

У 1950 р Марія Гепперт-Майер і Ханс Йенсен створили оболонкову модель структури ядра, в деякій мірі, аналогічну оболочечной моделі будови атома Бора.

Відповідно до цієї моделі, нейтрони і протони що містяться в ядрі розподілені по оболонкам.

Протони і нейтрони займають окремі енергетичні рівні (квантові стани) незалежно один від одного.

Число таких рівнів (оболонок) і кількість нуклонів на них визначаються законами квантової механіки.

Магічні числа ядерної структури

Модель Гепперт-Майер пояснює існування магічних чисел в фізиці ядра.

При заповненні чергової оболонки створюється надзвичайно стабільна конфігурація ядра.

Числа нейтронів або протонів, які відповідає заповненням оболонкам, названі магічними числами ядерної структури:

n 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184, 196, 228

p 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, 164

Дія цих чисел проявляється настільки сильно, що при проходженні числа нуклонів через кожне значення магічного числа, в ядрі змінюється розподіл заряду і форма заряду.

У тому випадку, коли число нейтронів N або число протонів Z дорівнює одному з магічних чисел, ядро називається магічним.

У тому випадку, коли і N і Z дорівнюють одному з магічних чисел, ядра є двічі магічними.

Двічі магічні ядра:

гелій-4, кисень-16, кальцій-40, кальцій-48 і свинець-208

ТЕМА 3

Закони радіоактивного розпаду

ТЕМА 3

- **Закони радіоактивного розпаду:**
 1. **Основний закон радіоактивного розпаду в диференціальній формі**
 2. **Основні закон радіоактивного розпаду в інтегральній формі**
- **Абсолютна радіоактивність**
- **Реєстрована радіоактивність**
- **Період напіврозпаду**
- **Радіоактивна рівновага**
- **Радіоактивні сімейства**
- **Радіоактивні ряди**

Закони радіоактивного розпаду

1. Основний закон радіоактивного розпаду в диференціальній формі

Нестабільність радіоактивних атомних ядер обумовлена їх внутрішньою будовою, і їх розпад відбувається з певною ймовірністю.

Загальна швидкість розпаду (тобто число ядер dN , що розпадаються за час dt) пропорційна числу наявних атомів N , :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1) \quad - \frac{dN}{N \cdot dt} = \lambda$$

Формула (1) математичний вираз основного закону радіоактивного розпаду в диференціальній формі.

Коефіцієнт пропорційності λ називається постійною розпаду і являє собою частку ядер, що розпадаються, в одиницю часу dt і має сенс ймовірності розпаду кожного окремого ядра в одиницю часу.

2. Основні закон радіоактивного розпаду в інтегральній формі

Якщо потрібно встановити кількість ядер, що не розпалися N_t , (залишилися) після закінчення проміжку часу t , то користуються інтегральною формою основного закону розпаду, яку отримують в результаті інтегрування формули 1 за умови, що в початковий момент часу $t = 0$, число ядер становило N_0 , тоді:

$$-\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = \int_{t_0}^t \lambda dt \quad \ln \frac{N_0}{N_t} = -\lambda t \quad N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Якщо необхідно встановити число ядер, які розпалися до моменту часу t , то записують:

$$N_p = N_0 - N_t \quad N_p = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

де N_p – число ядер, що розпалися до моменту часу t

Абсолютна радіоактивність

Швидкість радіоактивного розпаду

$$\frac{dN}{dt}$$

називається абсолютною радіоактивністю і позначається: A

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

а в інтегральній формі:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t}$$

Отже, активність зменшується в часі за таким же експоненціальним законом, що і число ядер N .

Відповідно до визначення – радіоактивність вимірюється числом розпадів в 1с. Одиницею радіоактивності в СІ є бекерель (Бк, Bq).

Реєстрована радіоактивність

- Вимірювальні прилади зазвичай дають величину, пропорційну A , її називають реєструється активністю I , яка пов'язана з абсолютною радіоактивністю через коефіцієнт φ :

$$I = A \cdot \varphi$$

- Реєстрована активність також слід основному закону радіоактивного розпаду

$$I_t = I_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Період напіврозпаду

Крім величини радіоактивної постійної стійкість радіоактивного ядра можна характеризувати також за допомогою періоду напіврозпаду $T_{1/2}$.

Періодом напіврозпаду $T_{1/2}$ називається проміжок часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер даного ізотопу.

Число ядер N , абсолютна активність A , що реєструється активність I , за час, що дорівнює періоду напіврозпаду зменшується вдвічі. Замінивши у виразі

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Якщо замінити N_t на $N_0/2$, а t на $T_{1/2}$ отримаємо: $1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}$

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

Радіоактивна рівновага

Закони радіоактивного розпаду в диференціальній і інтегральній формах справедливі в тому випадку, якщо кількість радіоактивних ядер тільки зменшується за рахунок розпаду.

Часто в результаті розпаду утворюється ядро нестабільного нукліда. У цьому випадку воно з часом також розпадається, має з цього впливати третій розпад і т.д., поки не виникне ядро стабільного нукліда.

Схематично ланцюжок послідовних розпадів можна записати:



Сукупність нуклідів, пов'язаних між собою взаємними радіоактивними перетвореннями називають радіоактивним сімейством.

Радіоактивна рівновага

У цих випадках, закон радіоактивного розпаду має більш складний вид. Для материнського речовини А швидкість розпаду

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

Для дочірнього речовини В швидкість зміни числа ядер виражається рівнянням:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

Звідкіля можна записати:

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt$$

Проінтегрувавши цей вислів і прийнявши, що в початковий момент часу кількість ядер дочірнього елемента було $N_2 = 0$, а період напіврозпаду материнського речовини набагато більше періоду напіврозпаду дочірнього отримаємо:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

Такий стан системи, при якому співвідношення кількості материнського і дочірніх ядер не змінюється з плином часу, називають радіоактивним рівновагою або віковою рівновагою.

Радіоактивні сімейства

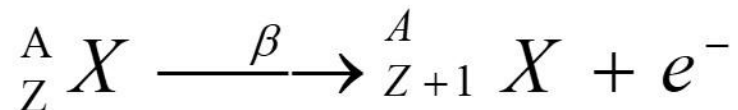
Як було зазначено вище, радіоактивні нукліди, що виникають один за одним, внаслідок розпаду однієї материнської речовини, утворюють радіоактивне сімейство,

Перехід одних елементів в інші здійснюється шляхом α і β -розпаду.

При α -розпаді масові числа змінюються відразу на 4, заряд ядра змінюється на 2 одиниці:



При β -розпаді масові числа не змінюються зовсім, а заряд збільшується на 1 і новий елемент зсувається вправо в періодичної системі:



Систематичне вивчення радіоактивних елементів, що зустрічаються в природі, показало, що всі вони можуть бути розташовані у вигляді трьох радіоактивних сімейств, які називають за їх родоначальниками – сімействами урану ^{238}U ; урану ^{235}U (актино-урану) і торію ^{232}Th . Четвертий ряд (нептунієвий) давно розпався.

Радіоактивні ряди

Структура масового числа	Назва сімейства	Материнське ядро	Період напіврозпаду	Кінцеве стабільне ядро
$A = 4n$	Торієве	${}^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ років	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
$A = 4n+1$	Нептунієве	${}^{237}_{93}\text{Np}$	$2,2 \cdot 10^6$ років	${}^{209}_{83}\text{Bi}$
$A = 4n+2$	Урано-радієве	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ років	${}^{206}_{82}\text{Pb}$
$A = 4n+3$	Урано-актинієве	${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,18 \cdot 10^8$ років	${}^{207}_{82}\text{Pb}$

Для будь-якого члена радіоактивного ряду справедливо вираз:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_i N_i$$

ТЕМА 4

Типи ядерних перетворень

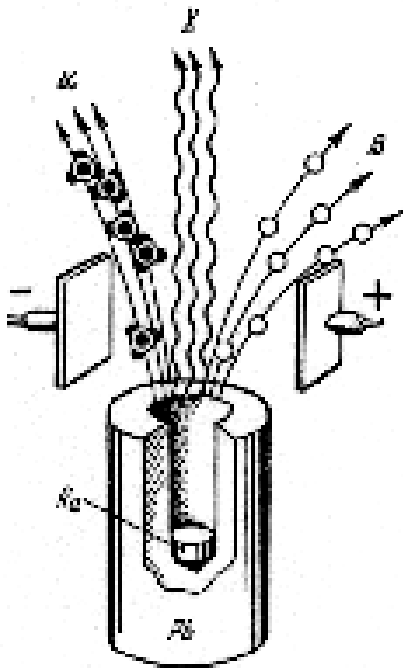


Рис. Відхилення альфа-, бета- і гамма-променів в електричному і магнітному полях

Радіоактивний розпад та його особливості

У 1899 р. Е. Резерфорд встановив, що випромінювання урану складається з двох компонент, позначених згодом першими літерами грецького алфавіту α і β , через рік Поль Війар відкрив гамма-випромінювання (γ).

У 1903 р. Е. Резерфордом і Фредеріком Содді була запропонована теорія радіоактивного розпаду атомів, згідно з якою в результаті радіоактивного розпаду відбувається перетворення одного хімічного елемента в інший.

У 1913 р. Ф. Содді і Казимир Фаянс незалежно один від одного сформулювали правило зсуву при різних видах радіоактивного розпаду.

Радіоактивні перетворення володіють двома особливостями, які роблять їх більш простими в порівнянні з хімічними перетвореннями.

Перша особливість полягає в тому, що для всіх типів радіоактивних перетворень справедливий один кінетичний закон.

Друга особливість полягає в тому, що кількість типів радіоактивних перетворень дуже обмежена.

Типи ядерних перетворень

В даний час відомо сім основних типів радіоактивного розпаду:

1. альфа-розпад,
2. бета-розпад,
3. електронне захоплення,
4. гамма-розпад,
5. спонтанне ділення,
6. випускання запізненого нейтрона і випускання запізненого протона.

Радіоактивний розпад в загальному вигляді можна записати рівнянням:



де, A – материнський нуклід, B – дочірний нуклід, X – випускається частка або гамма-квант, ΔE – повна енергія радіоактивного розпаду.

Розглянемо основні типи ядерних перетворень.

Альфа-розпад (α - розпад)

Альфа-розпадом називається ядерне перетворення, при якому з ядра вилітає α -частка, що є ядром атома гелію яка рухається зі швидкістю $1,4 \cdot 10^3 - 2,6 \cdot 10^3$ км/с. Пробіг в повітрі 2,5–9 см.

Перетворення з випусканням α -частинок характерні в основному для ядер атомів важких елементів, виняток становлять ядра ${}^8_4\text{Be}$, що практично миттєво розпадаються на дві α -частинки, а також штучно одержуваного ізотопу ${}^{152}\text{Sm}$.

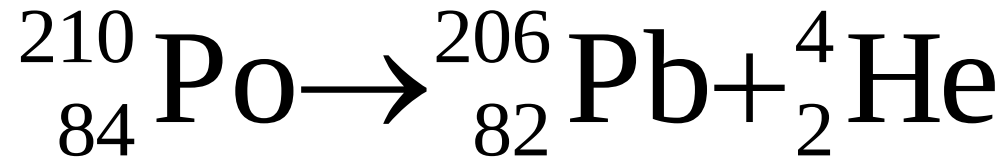
Особливості альфа-розпаду

За сучасними уявленнями альфа-частинок в ядрі постійно не існує. Вони утворюються при зустрічі двох протонів і двох нейтронів, тобто при надлишку протонів і нейтронів.

У той же час, щоб альфа-частинки могла покинути ядро, їй необхідно подолати ядерні сили і потенційний бар'єр, величина якого 25–30 MeV. Енергія ж альфа-частинок покидають ядро лежить в межах 4–9 MeV.

Ця невідповідність пояснюється квантовою механікою, згідно з якою, альфа-частинок притаманні хвильові властивості.

Схема альфа-розпаду



Правило зміщення при альфа-розпаді. Енергетичні умови альфа-розпаду

Згідно з правилом зміщення Фаянсу і Содді α - розпад завжди призводить до виникнення ізотопу елемента, зміщеного на дві клітини лівіше від вихідного елемента в періодичній системі і має на чотири одиниці менше масове число:

$$\alpha \quad \begin{cases} Z \rightarrow Z - 2 \\ A \rightarrow A - 4 \end{cases}$$

або

$$(A, Z) \rightarrow (A - 4, Z - 2) + \alpha.$$

Якщо позначити масу вихідного (материнського) ядра M , масу дочірнього M_1 і масу α -частинки m_α , то енергетичне умова мимовільного α -розпаду може бути записано як:

$$MC^2 > M_1C^2 + m_\alpha C^2.$$

Закон Гейгера-Неттола

Важлива властивість α -розпаду полягає в тому, що періоди напіврозпаду вихідного ядра змінюються в величезних межах, а енергія α -частинок лежить в порівняно вузькому інтервалі приблизно від 4 до 9 MeV.

Встановлено також, що чим менше період напіврозпаду, тим більше енергія α -частинок.

Гейгер і Неттол вивели емпіричне рівняння, що описує з хорошою точністю більшість випадків α -розпаду:

$$\lg T_{1/2} = AB - E_{\alpha}$$

Бета-розпад (β -розпад)

Бета-розпадом називається процес мимовільного перетворення нейтрального ядра в ядро – ізобар з зарядом відмінним на $\Delta Z = \pm 1$.

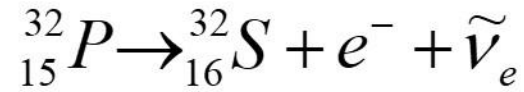
Швидкість β -частинок, що випускаються при бета-розпаді близька до швидкості світла.

Відомі три види β -розпаду:

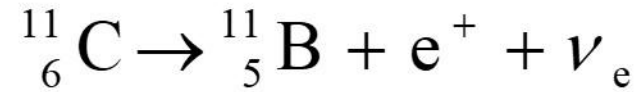
1. Електронний β -розпад
2. Позитронний β^+ -распад
3. Захват електрона ядром з одної з ближніх до ядра оболонок, частіш усього К-оболонки.

Схеми бета-розпаду

$$\beta^- - n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$$



$$\beta^+ - p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$$



$$K_{\text{захв.}} - p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu_e$$



Як видно з схем бета-перетворень, характерною рисою всіх видів перетворень є випускання нейтрино **ν_e** або антинейтрино. **$\tilde{\nu}_e$** .

Вперше поняття про нейтрино ввів В. Паулі в 1930р. для пояснення «втраченої» частини енергії при радіоактивному розпаді з випусканням електрона.

Як показали експериментальні дані, сумарна енергія частинок і гамма-квантів, що випускаються виявлялася дещо меншою енергії частинок, що вступають у взаємодію.

Паулі припустив, що відсутня частина енергії відлітає з часткою, яку він назвав «нейтрино».

Правила зміщення при бета-розпаді

$$\beta^{-} \quad \begin{cases} Z \rightarrow Z + 1 \\ A \rightarrow A \end{cases}$$

$$\beta^{+} \quad \begin{cases} Z \rightarrow Z - 1 \\ A \rightarrow A \end{cases}$$

$$K_{\text{захв}} \quad \begin{cases} Z \rightarrow Z - 1 \\ A \rightarrow A \end{cases}$$

Позитронний розпад

Позитронна емісія дуже рідкісна у природних радіонуклідів і спостерігається в основному у штучно отриманих радіонуклідів за допомогою прискорювачів частинок.

Позитронний розпад може протікати в разі, якщо різниця енергій в кінцевому і вихідному станах перевищує 1,02 MeV, тобто більше маси спокою двох електронів.

$$\beta^+ - p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$$



$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma + 1,02\text{MeV}$$

К-захоплення

Якщо значення енергії перетворення менше 1,02 MeV, то емісія позитронів неможлива.

В цьому випадку материнський нуклід переходить в дочірній шляхом захоплення електрона, так званого К-захоплення.

Для ядер важких елементів з недоліком нейтронів (нейтронодефіцитних ядро), перетворення протонів в нейтрони відбувається тільки за механізмом електронного К-захоплення.

Оскільки в атомі К-електрони в середньому знаходяться найближче до ядра, то існує певна ймовірність захоплення ядром електрона з К-оболонки



К-захоплення (характеристичне рентгенівське випромінювання)

При захопленні електрона ядром атом виявляється в збудженому стані, тому що на місце, що звільнилося на нижньому енергетичному рівні одразу переходять орбітальні електрони з оболонок розташованих вище.

Це збудження знімається шляхом випускання кванта характеристичного рентгенівського випромінювання.

Електронне захоплення легко виявляється по супроводжуючому його рентгенівському випромінюванню.

Саме цим шляхом і був відкритий К-захоплення Альварецом в 1937 р.

К-захоплення (електрони Оже)

К-захоплення може супроводжуватися випусканням конверсійних електронів (електронів Оже) зі збуджених електронних оболонок атома.

Випускання електронів Оже характерно для легких атомів, при цьому енергія, що передається електрону, перевищує енергію, необхідну для відриву даного електрона від атома.

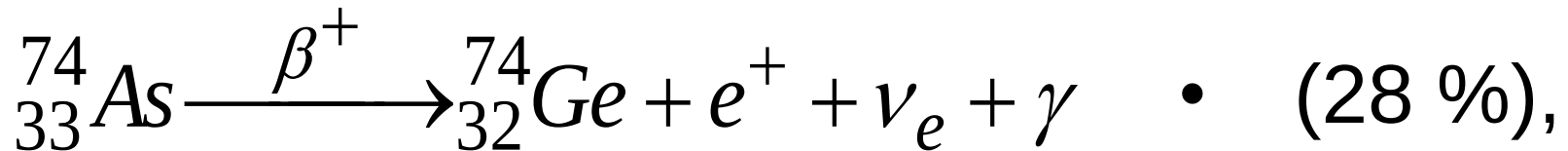
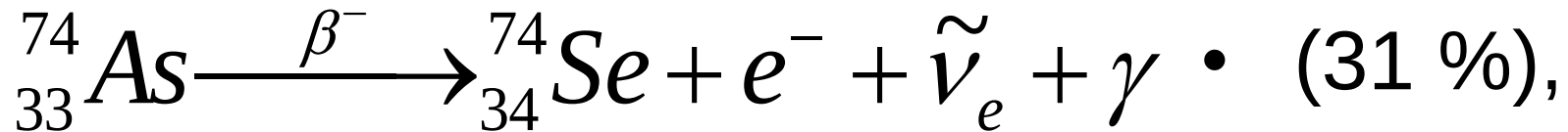
Спектр випущених конверсійних електронів завжди є лінійчатим зважаючи на їх моноенергетичність через прив'язку до конкретної електронної оболонки.

У той же час спектр електронів бета-розпаду є безперервним через те, що при бета-розпаді енергія між електроном і електронним антинейтрино розподіляється за законом випадковостей.

Енергетичні умови β -перетворень

- (β^-) -розпад: ${}^A_Z\text{MC}^2 > {}^A_{Z+1}\text{MC}^2 + m_{e^-}C^2$
- (β^+) -розпад: ${}^A_Z\text{MC}^2 > {}^A_{Z-1}\text{MC}^2 + m_{e^+}C^2$
- К-захоплення: ${}^A_Z\text{MC}^2 + m_e C^2 > {}^A_{Z-1}\text{MC}^2$

Три варіанти β -розпаду:



Гамма-випромінювання ядер (ізомерний перехід)

Під гамма-випромінюванням розуміється електромагнітне (фотонне) випромінювання, що випускається при ядерних перетвореннях.

Гамма-кванти випускається не безпосередньо радіоактивною речовиною, а дочірнім нуклідом, який знаходиться не в основному, а в збудженому стані.

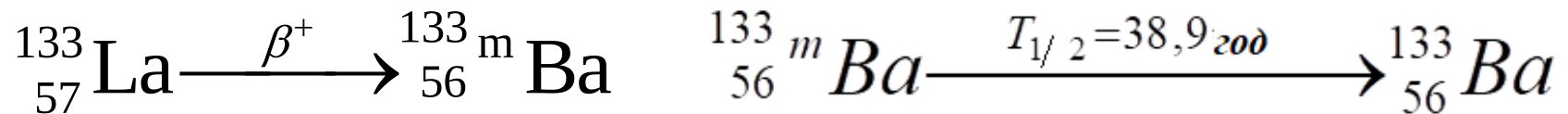
Перехід дочірнього ядра із збудженого стану в основний призводить до емісії γ -квантів .



Гамма-випромінювання ядер (ізомерний перехід)

Однак в деяких випадках, через квантово-механічні заборони час життя ядра в збудженому стані може виявитися досить великим.

Зовні розпад таких порушених ядер виглядає як звичайний радіоактивний розпад з випусканням тільки γ -квантів, тобто як γ -розпад.



$$\gamma \quad \begin{cases} Z \rightarrow Z \\ A \rightarrow A \end{cases} \quad E_\gamma = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Гамма-випромінювання має ту ж природу, що і радіохвилі, рентгенівські промені, видиме, ультрафіолетове, інфрачервоне світло. Всі ці види випромінювання відрізняються умовами утворення і властивостями (енергією, частотою, довжиною хвилі) (Таблиця 4).

Таблиця 4

Основні види електромагнітного випромінювання

Вид випромінювання	Енергія фотонів, еВ	Довжина хвилі, см
Радіо (до УВЧ)	$< 0,00001 (10^{-5})$	> 10
Мікрохвильове	$10^{-5} - 10^{-2}$	$0,01 - 10$
Інфрачервоне	$0,01 - 1$	$0,0001 - 0,01$
Видиме	$1 - 6$	$10^{-5} - 10^{-4}$
Ультрафіолетове	$6 - 10^3$	$10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$
Рентгенівське	$10^3 - 10^5$	$10^{-9} - 10^{-7}$
Власне γ -випромінювання	$> 10^5$	$10^{-8} - 10^{-12}$

Спонтанне ділення

Спонтанний поділ – це процес радіоактивного розпаду, при якому материнське ядро розпадається в основному стані і без будь-якого впливу ззовні на два осколки з близькими масами. Наприклад, при розподілі ядра урану можуть утворюватися осколкові ядра Ba і Kr, La, Br і так далі.

Спонтанний (мимовільний) поділ U-238 виявили в 1940 р. радянські фізики Георгій Миколайович Флеров і Костянтин Антонович Петржак. Період напіврозпаду спонтанного ділення U-238 був оцінений ними приблизно в 10^{15} – 10^{16} років.

Процес спонтанного поділу прийнято позначати буквою f .

Спонтанний поділ атомних ядер особливий процес, характерний тільки для найважчих ядер, починаючи від торію і далі в бік великих Z.

Для більшості важких ядер, крім спонтанного поділу характерним є альфа-розпад.

Найчастіше спонтанне ділення становить лише невелику частину від загального альфа-розпаду.

Спонтанне ділення

Періоди напіврозпаду спонтанного ділення важких ядер

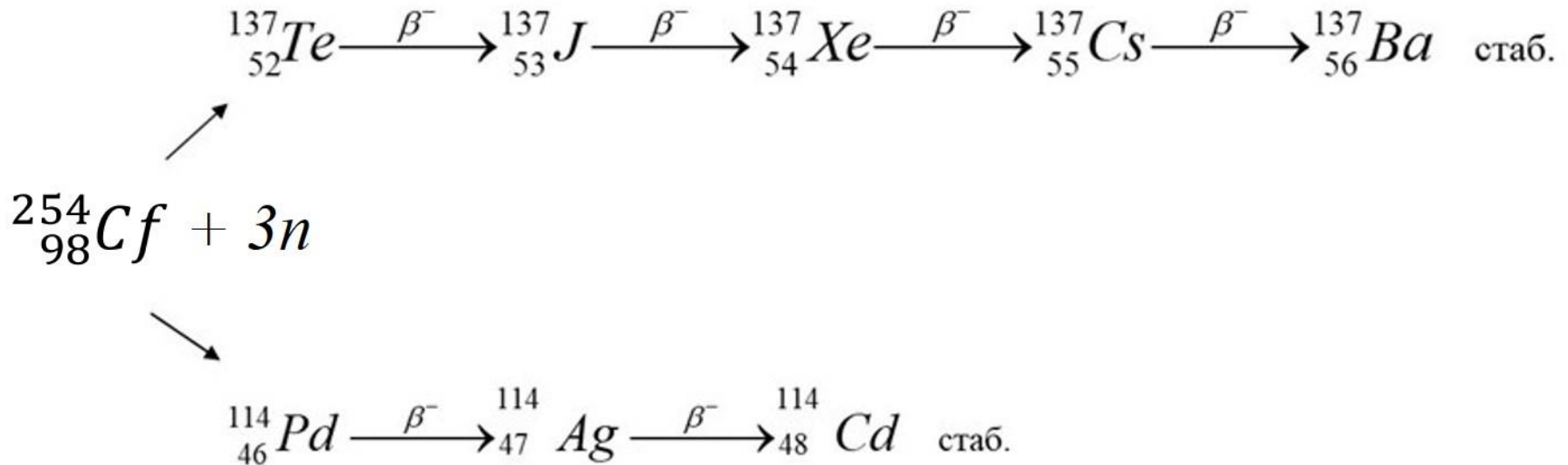
Ядро	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{94}^{242}\text{Pu}$	${}_{96}^{242}\text{Cm}$	${}_{98}^{246}\text{Cf}$	${}_{100}^{254}\text{Fm}$
$T_{1/2}$,	$3,0 \cdot 10^{17}$ р.	$7,4 \cdot 10^{10}$ р.	$6,0 \cdot 10^6$ р.	1500 р.	228 дні

Періоди напіврозпаду α -розпаду важких ядер

Ядро	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{94}^{242}\text{Pu}$	${}_{96}^{242}\text{Cm}$	${}_{98}^{246}\text{Cf}$	${}_{100}^{254}\text{Fm}$
$T_{1/2}$,	$7,13 \cdot 10^8$ р.	$3,8 \cdot 10^5$ р.	163 дні	35,7 год.	3,24 год.

Спонтанне ділення

Кожен акт спонтанного поділу супроводжується випусканням одного або декількох нейтронів. Осколки поділу виявляються перевантаженими нейтронами і відчують послідовно ряд β -розпадів:



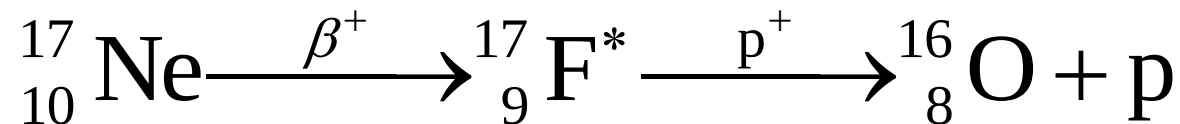
Випускання запізнiлого протона

Випускання запізнiлого протона було виявлено в 1962р. Г. Флерова у штучних радiонуклiдiв продуктiв ядерних реакцiй при високих енергiях.

Цей тип розпаду можливий лише в разi дочiрнiх ядер, що мають надлишок протонiв i проходять через позитронний розпад.

Позитронний розпад призводить до утворення ядра - продукту в збудженому станi, практично миттєво (за час $<10^{-12}\text{с}$) випускає протон.

Тут позитронний розпад супроводжується протонним розпадом, причому перiоди напiврозпаду для обох розпадiв однаковi.



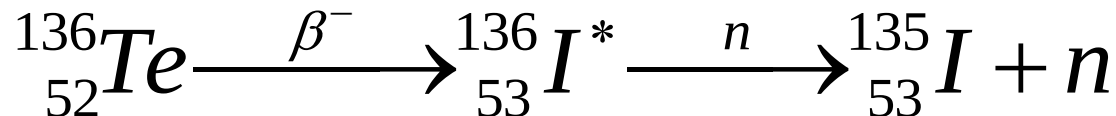
Випускання запізнiлого нейтрона

Крім нейтронів, що безпосередньо утворюються в момент поділу ядер в ядерному реакторі спостерігається також випускання так званих запізнiлих нейтронів.

Такий тип розпаду має місце тоді, коли енергія збудження осколкового ядра, що зазнав β -розпад, перевищує енергію зв'язку нейтрона в ядрі.

В цьому випадку процес β -розпада супроводжується випусканням нейтронів, причому періоди напіврозпаду обох процесів однакові. Емісія запізнiлих нейтронів найчастіше спостерігається при числі нейтронів, що перевищує магічне число. Запізнiлі нейтрони грають важливу роль в управлінні ядерними реакторами, так як вони надають реактору деяку інерцію і тим самим роблять його легко керованим.

Процес випускання запізнiлих нейтронів підпорядковується експоненціальним законом. Періоди напіврозпаду цих процесів коливаються від 0,114с до 2год.



ТЕМА 5

Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною

Тема 5

Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною
Пружні і непружні взаємодії

1. Взаємодія α -частинок з речовиною

- 1.1. Питомі іонізаційні втрати α -частинок
- 1.2. Довжина пробігу α -частинок в речовині

2. Взаємодія β -частинок з речовиною

- 2.1. Іонізація. Іонізаційні втрати
- 2.2. Збудження атома
- 2.3. Гальмівне випромінювання (радіаційні втрати)
- 2.4. Випромінювання Вавилова-Черенкова
- 2.5. Електронно-позитронна анігіляція
- 2.6. Пробіги бета-частинок в речовині

3. Взаємодія гамма-квантів з речовиною

- 3.1. Фотоефект
- 3.2. Комптонівське розсіювання
- 3.3. Утворення електрон-позитронної пари
- 3.4. Ослаблення гамма-випромінювання в 3 речовини

4. Взаємодія нейтронів з речовиною

- 4.1. Взаємодія швидких нейтронів з речовиною
- 4.2. Радіаційне захоплення повільної та теплових нейтронів
- 4.3. Розщеплення (примусовий поділ) ядра
- 4.4. Ослаблення пучка нейтронів
- 4.5. Повний ефективний мікроскопічний перетин
- 4.6. Пропускання нейтронів шаром речовини
- 4.7. Макроскопічний перетин
- 4.8. Довжина вільного пробігу нейтронів

Взаємодія ядерного випромінювання з речовиною

Потоки всіх частинок, що виникають при природних процесах і одержуваних штучно, об'єднують під загальною назвою ядерного випромінювання.

Всі види ядерного випромінювання, як корпускулярні, так і електромагнітні, можуть бути виявлені тільки по їх взаємодії з речовиною.

Процес взаємодії з речовиною, в результаті якого заряджені частинки втрачають енергію внаслідок іонізації і збудження, називається іонізаційним гальмуванням, а втрати енергії називаються іонізаційними втратами.

Пружні і непружні взаємодії

Розрізняють два види взаємодії ядерного випромінювання з речовиною – пружні і непружні.

При пружній взаємодії сума кінетичних енергій взаємодіючих частинок (або фотонів і частинок) не змінюється, відбувається лише перерозподіл енергії між учасниками взаємодії.

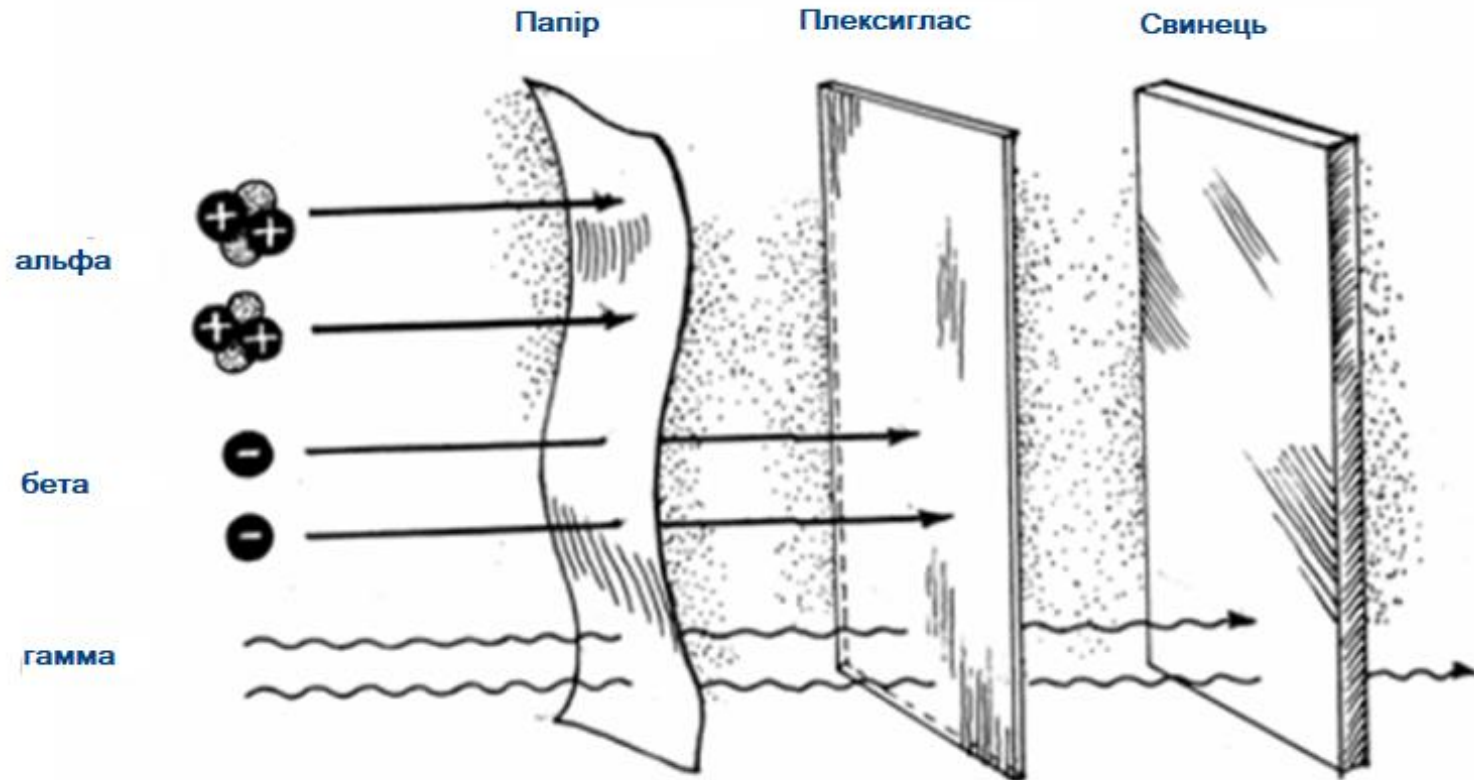
При цьому самі частинки змінюють напрямок свого руху, тобто відбувається процес розсіювання.

Ця взаємодія так і називається – пружне розсіювання.

Такі процеси не становлять інтересу, крім випадку, коли в результаті пружної взаємодії гамма-кванта частина його енергії передається вільному електрону.

При непружній взаємодії сума кінетичних енергій учасників взаємодії зменшується, тому що частина кінетичної енергії переходить в інші форми: енергію збудження, енергію розриву зв'язків (іонізацію) і, в кінцевому рахунку розсіюється у вигляді теплоти і довгохвильового випромінювання

Пройходження ядерного випромінювання через різні матеріали



1. Взаємодія α -частинок з речовиною

Важкі заряджені α -частинки взаємодіють головним чином з електронами атомних оболонок, викликаючи іонізацію атомів. Альфачастинка з енергією 1 MeV створює на шляху свого руху повітря близько 200000 пар іонів.

Максимальна енергія, яка може бути передана в одному акті взаємодії важкої часткою, що рухається зі швидкістю $v \ll c$, нерухомому електрону, дорівнює:

$$\Delta E_{\max} = 2m_e v^2$$

Основними процесами при взаємодії альфа-частинок з речовиною є процеси іонізаційного гальмування.

Іонізація атомів середовища альфа-частками можлива тільки тоді, коли енергія, що віддається альфа-частинкою електрону, більша енергії його зв'язку з атомом (енергії іонізації атома).

Завдяки різниці мас взаємодіючих частинок ($m_\alpha = 7350m_e$), альфа-частинки практично не відхиляється від первинного напрямку, траєкторія руху її прямолінійна (за винятком випадків проходження поблизу ядра або зіткнення з ним).

1.1. Питомі іонізаційні втрати α -частинок

Проходячи через речовину, альфа- частка робить десятки тисяч зіткнень, поступово втрачаючи енергію.

Пройшовши певний для даного радіонукліда шлях, альфа-частинки втрачає енергію на іонізацію і збудження атомів і молекул середовища.

Основними процесами при взаємодії альфа-частинок з речовиною є процеси іонізаційного гальмування.

Гальмівна здатність речовини відносно альфа- частинок характеризується величиною питомих іонізаційних втрат dE / dx (рівняння Блоха і Бете):

$$\left(-\frac{dE_{\alpha}}{dx} \right)_{ion.} \approx \frac{4\pi z_{\alpha}^2 \cdot e^4}{m_e \cdot v^2} \cdot n_A \cdot Z \cdot B$$

де z_{α} – заряд α -частинки; v – середня швидкість частинки см/с; Z – атомний номер поглинач; m_e – маса спокою електрона;

n_A – число атомів поглинач в 1 м³ поглинач; $n_A = N_0 \cdot \rho / A$, где N_0 – число Авогадро, ρ – щільність, кг/м³ поглинач; A – атомна маса поглинач;

B – коефіцієнт гальмування .

Після заміни $n_A = N_0 \cdot \rho / A$ и об'єднання постійних величин в K отримаємо:

$$\left(-\frac{dE_{\alpha}}{dx} \right)_{ion.} \approx K \frac{\rho}{A} \cdot Z \cdot B$$

1.2. Довжина пробігу α -частинок в речовині

Питомі втрати енергії альфа-частинки зростають зі зменшенням їх енергії і особливо різко перед зупинкою в речовині.

Цей ефект використовується в терапії раку, де дуже важливо забезпечити максимальне виділення енергії в глибоко розташованій пухлині, завдаючи при цьому мінімальну шкоду здоровій тканині.

Шлях, який проходить α -частинка до повної втрати енергії, називається довжиною пробігу, є константою, що характеризує α -випромінювання і позначається R .

Пробіг R вимірюється в м або в масовій товщині (d) (кг/м^2) поглинач.

Довжина пробігу в повітрі і енергія α -частинки взаємопов'язані емпіричним співвідношенням:

$$R_{\text{пов.}} = K \cdot E_{\alpha}^{3/2}$$

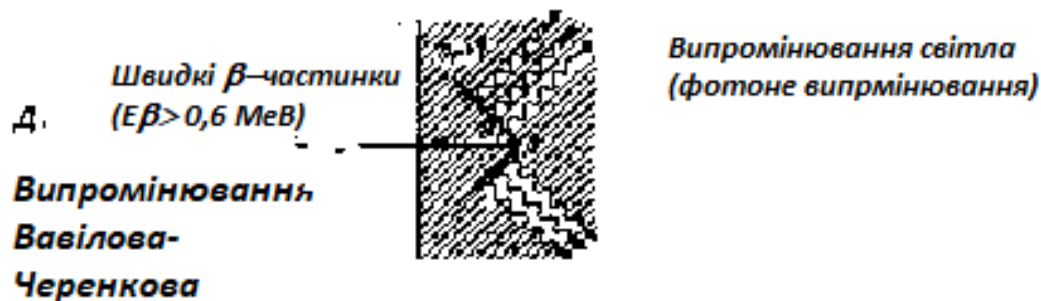
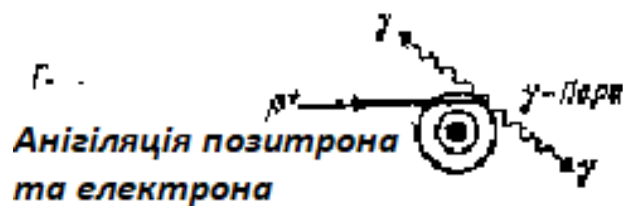
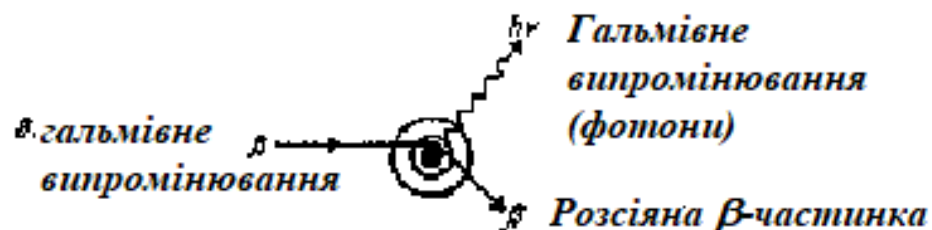
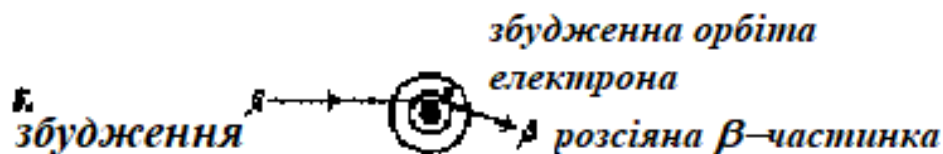
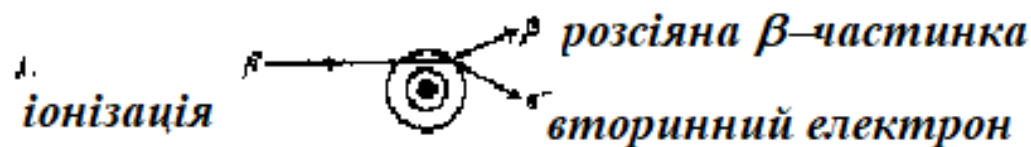
2. Взаємодія β -частинок з речовиною

Поглинання потоків електронів високої енергії речовиною протікає внаслідок взаємодії з орбітальними електронами та кулонівським полем ядра атома.

Бета-частинки завдяки малій масі, заряду і великій початковій швидкості, мають значно меншу іонізуючу здатність порівняно з альфа-частинками.

Бета-частинка з енергією 1 MeV створює на шляху свого руху повітря близько 30 000 пар іонів.

Основними процесами при взаємодії β -частинок із речовиною є процеси іонізаційного та радіаційного гальмування (рис.).



2.1. Іонізація. Іонізаційні втрати

Розглянемо докладніше основні процеси, які супроводжують проходження бета-частинок через речовину.

Якщо спочатку всі електрони мали строго однакові енергії, то в міру поглиблення в речовину виникає і швидко збільшується розкид електронів по енергіях.

Середня енергія електронів при цьому зменшується.

Приблизно одна половина повної енергії β -частинки витрачається на іонізацію, а інша - на збудження.

Гальмівна здатність речовини відносно бета-частинок характеризується величиною питомих іонізаційних втрат dE / dx (рівняння Блоха і Бете):

$$\left(- \frac{dE_{\beta}}{dx} \right)_{ion} = \frac{4\pi \cdot e^4}{m_e \cdot v^2} \cdot n_A \cdot Z \cdot B \qquad \left(- \frac{dE}{dX} \right)_{ion.} \approx K \cdot \rho \frac{Z}{A}$$

де m_e – маса спокою електрона; v – швидкість електрона; Z – атомний номер поглинач; m_e – маса спокою електрона; n_A – число атомів поглинач в 1 м³ поглинач; $n_A = N_0 \cdot \rho / A$, где N_0 – число Авогадро, ρ – щільність, кг/м³ поглинач; A – атомна маса поглинач; B – коефіцієнт гальмування.

2.2. Збудження атома

Збудження атома відбувається тоді, коли первинне випромінювання передає атомам середовища енергію недостатню для іонізації.

При цьому електрон займає більш високий рівень енергії збудження атома.

Збуджені атоми швидко повертаються на більш низькі енергетичні рівні шляхом емісії електромагнітного випромінювання, наприклад рентгенівського або видимого світла.

2.3. Гальмівне випромінювання (радіаційні втрати)

На відміну від заряджених частинок з великою масою, при русі β -частинок через поглинаючу середу, істотну роль поряд з іонізаційними втратами відіграють втрати на випромінювання, що виникає при гальмуванні електронів у кулонівському полі ядер.

При прольоті β -частинки поруч з ядром, він притягується його позитивним полем.

Швидкість β -частинки сильно змінюється, вона набуває деяке прискорення, що згідно з класичною електродинаміки, супроводжується електромагнітним випромінюванням.

При цьому енергія β -частинки зменшується на ΔE і передається, кванту електромагнітного випромінювання, званого гальмівним, а втрати енергії – радіаційними. Середні радіаційні втрати енергії електронів на одиницю довжини шляху становлять:

$$\left(-\frac{dE}{dX} \right)_{rad.} \approx Z^2 \cdot E_{\beta} \cdot \frac{\rho}{A} F$$

де Z – атомний номер поглинача; E_{β} – енергія електрона; F – функція радіаційних втрат.

2.4. Випромінювання Вавилова-Черенкова



- Крім іонізаційних і радіаційних втрат при проходженні через прозоре середовище (водні розчини, плексиглас, свинцеве скло та ін.) швидких електронів можливі втрати енергії на випромінювання Вавилова-Черенкова.
- Якщо β -частинки рухаються в прозорому середовищі зі швидкістю перевищує швидкість світла ($E_\beta > 0,6 \text{ MeV}$), то в середовищі при проходженні частинки когерентно випускається електромагнітне (фотонне) випромінювання в конусі, вісь якого збігається з напрямком руху частинки).
- Таке випромінювання називається випромінюванням Вавилова-Черенкова і спостерігається при зануренні відпрацьованих ТВЕЛів у басейн охолодження.

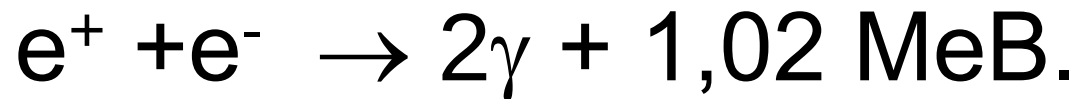
2.5. Електронно-позитронна анігіляція

Позитрони так само як і негативні електрони взаємодіють з речовиною в результаті іонізації, збудження, випускання гальмівного випромінювання і випромінювання Вавилова-Черенкова.

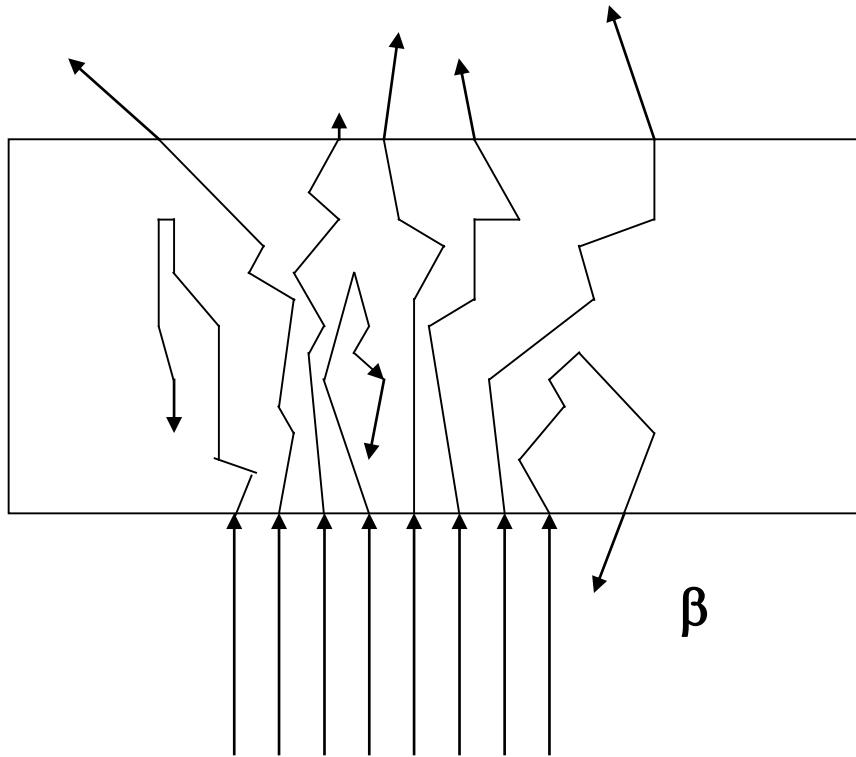
Кінетична енергія позитрона в поглиначі зменшується, тому ймовірність прямої взаємодії між позитроном і електроном зростає.

При цьому позитрон і електрон анігілюють з випусканням фотонів.

Енергія відповідна масі двох електронів, перетворюється в електромагнітне випромінювання:



2.6. Пробіги бета-частинок в речовині



В результаті описаних вище процесів у міру проходження через речовина початковий паралельний пучок моноенергетичних електронів перетворюється в дифузний потік частинок зі складним просторово-енергетичним розподілом.

При цьому безглуздо говорити про довжину пробігу одного електрона, важливіше знати частку загального числа електронів, здатних пройти шар речовини, заданої товщини.

2.6. Пробіги бета-частинок в речовині

Експериментально встановлено, що зменшення кількості β -частинок при проходженні через середовище носить характер, близький до експоненційного.

$$N_x = N_0 e^{-\mu' x}; \quad \mu = \mu' / \rho; \quad N_d = N_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad I_x = I_0 \cdot e^{-\mu x},$$

де N_x – число частинок, що пройшли через шар речовини X -, м;

N_0 – число частинок, що входять;

N_d – число частинок, що пройшли через шар речовини, d;

I_0 I_x – інтенсивності до і після проходження бета-випромінювання через шар речовини

μ' -ли(м-1) –лінійний коефіцієнт поглинання бета частинок ;

μ -(м2/кг) масовий коефіцієнт поглинання бета-частинок;

X -товщина поглинач (м);

d- товщина поглинач (кг/м2).

2.6. Пробіги бета-частинок в речовині

Проникаючу здатність електронів β -випромінювання характеризують величиною максимального пробігу $R_{\max}$.

$R_{\max}$ – мінімальна товщина поглинача, при якій повністю затримуються β -частинки з початковою енергією рівній максимальній енергії β -спектра $E_{\max}$.

Існує кілька емпіричних рівнянь, що описують співвідношення між $R_{\max}$ і $E_{\max}$ при проходженні бета-частинок через алюміній.

Емпіричні рівняння, що описують співвідношення між $R_{\max}$ і $E_{\max}$ при проходженні бета-частинок через алюміній

$$E = 1,92 \sqrt{R_{\max}^2 + 0,22 R}$$

при E від 0,3 до 3 MeV

$$E = 1.85 \cdot R + 0.245$$

при $E > 0,8$ MeV

$$E = 1.92 \cdot R^{0.725}$$

при $0,15 < E < 0,8$ MeV

Таблиця 5. Ефективні пробіги (см) бета-частинок в різних речовинах в залежності від їх енергії

Енергія електрона, MeV	0,05	0,5	5	50	500
Повітря	4,1	160	$2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
Вода	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,19	2,6	19	78
Алюміній	$2 \cdot 10^{-3}$	0,056	0,95	4,3	8,6
Свинець	$5 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,30	1,25	2,5

3. Взаємодія гамма-квантів з речовиною

Взаємодія гамма-квантів з речовиною докорінно відрізняється від взаємодії заряджених частинок.

Перш за все, для гамма-квантів не застосовується поняття уповільнення.

Швидкість їх не залежить від енергії і дорівнює приблизно 300000 км/с.

Крім того, вони не мають заряду і тому не відчують уповільнюючої кулонівської взаємодії.

Проте, для γ -квантів ефективна взаємодія з речовиною може проявлятися вже на відстані десятих часток ангстрема

Ця взаємодія відбувається при прямому зіткненні гамма кванта з атомним електроном або ядром.

Гамма-квант своїм електромагнітним полем може взаємодіяти з електричними зарядами цих частинок і передати їм при цьому повністю або частково свою енергію

В області енергій від 0,5 до сотень МеВ головну роль у втраті енергії γ -квантів грають 3 процеси, що викликають ослаблення інтенсивності γ -випромінювання: фотоефект, комптонівське розсіювання і утворення електронно-позитронного пар (рис.).

Взаємодія гамма-квантів з речовиною

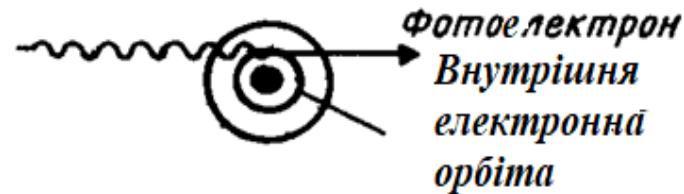
А. Когерентне
розсіювання

$$\sigma_{\text{ког}} \propto Z^2 / E_{\gamma}$$



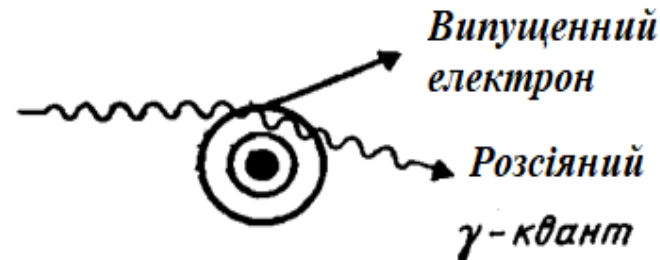
Б. Фотоефект

$$\sigma_{\text{фот}} \propto Z^5 / E_{\gamma}^{3.5}$$



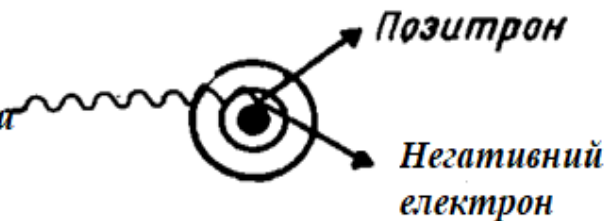
В. Ефект
Комптона

$$\sigma_{\text{комп}} \propto Z / E_{\gamma}$$



Г. Утворення
електронно-
позитронної пари

$$\sigma_{\text{пар}} \propto Z^2 / E_{\gamma}$$



3.1. Фотоефект

Фотоефект – процес повної передачі γ -квантом всієї енергії одному з електронів, що знаходяться на внутрішніх орбітах зустрічного атома. При цьому γ -квант повністю зникає, а електрон вилітає з атома з енергією:

$$E_e = E_\gamma - E_{зв}$$

де $E_{зв.e}$ – енергія зв'язку електрона в атомі; E_γ – енергія фотона.

Фотоелектрон, в принципі, може бути вибитий з будь-якої оболонки атома (K, L, M і т.д.), енергія зв'язку якої менше енергії фотона. Фотоефект спостерігається в основному при взаємодії з речовиною γ -квантів малих енергій до 1 MeV.

З ростом атомного номера поглинача ймовірність фотоефекту зростає пропорційно Z^5 .

З ростом енергії γ -квантів ймовірність фотоелектричного поглинання різко зменшується.

Характеристичне рентгенівського випромінювання. Електрони Оже

Після вильоту фотоелектронів на одній з внутрішніх оболонок атома, з якої був вибитий електрон, залишається вакансія – атом виявляється в збудженому стані.

Це збудження знімається при переході атомного електрона з більш високою оболонки на нижчу.

При цьому випускається або квант характеристичного рентгенівського випромінювання (флуоресцентне випромінювання), або електрони Оже (коли енергія збудження не виділяється у вигляді характеристичного рентгенівського випромінювання, або передається одному або декільком орбітальним електронам).

На відміну від β -частинок, вони завжди мають дискретні значення енергії (див. В β -розпаді – К-захоплення).

Вірогідність випускання електронів Оже велика для відносно легких матеріалів ($Z < 33$), для важких матеріалів (атомів) збудження знімається випусканням характеристичного рентгенівського випромінювання.

3.2. Комптонівське розсіювання

Комптонівським розсіюванням називається пружне розсіяння фотонів на «вільних» електронах.

$$E_{e^{-}} = E_{\gamma} - E'_{\gamma}$$

При комптонівському розсіюванні напрямок вильоту електронів віддачі у переважно здовж первісного напрямку руху γ -кванта. Явище Комптона супроводжується іонізацією середовища, в якій поширюється гамма-випромінювання

Починаючи з енергії 0,6 MeV, комптонівське розсіювання, навіть при проходженні через шари важких елементів, переважає над фотоефектом.

Імовірність комптонівського розсіяння пропорційна Z речовини поглинача і убуває з ростом енергії фотонів, але повільніше, ніж ймовірність фотоефекту.

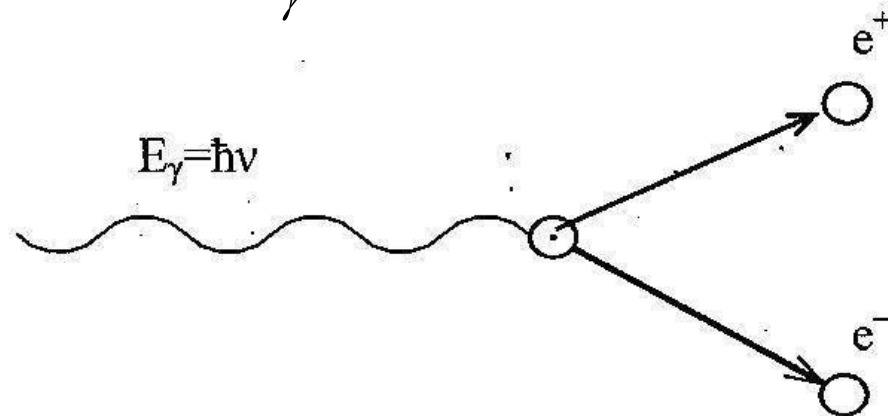
3.3. Утворення електрон-позитронної пари

Утворення електрон-позитронної пари відбувається при взаємодії електромагнітного поля фотона з електричним полем ядра.

При цьому фотон зникає, а його енергія перетворюється в енергію спокою двох нових частинок: електрона і позитрона.

Цей процес може відбуватися, якщо енергія γ -квантів більше 1.02 MeV (маси спокою обох частинок).

$$E_{\gamma} > 1.02 \text{ MeV}$$



3.4. Ослаблення гамма-випромінювання в 3 речовини

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu' x} \qquad I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

де I_0 та I_x – інтенсивності до і після проходження γ -випромінювання через шар речовини;

μ' -ли(м-1) – лінійний коефіцієнт поглинання фотонів;

μ -(м²/кг) – масовий коефіцієнт поглинання фотонів;

x – товщина поглиначи (м);

d – товщина поглиначи (кг/м²).

Таблиця 6. Лінійні коефіцієнти передачі μ_n і лінійні коефіцієнти ослаблення μ' , в різних середовищах, см^{-1}

Енергия γ -квантов MeB	Вода		Алюміній		Свинець	
	μ_n	μ'	μ_n	μ'	μ_n	μ'
0,1	0,0253	0,171	0,1002	0,444	24,494	60,0
0,2	0,0299	0,137	0,0742	0,323	6,645	11,8
0,5	0,0330	0,097	0,0775	0,228	1,022	1,72
1,0	0,0310	0,0706	0,0726	0,166	0,435	0,79
2,0	0,0260	0,0493	0,0613	0,117	0,218	0,51
5,0	0,0189	0,0302	0,0486	0,075	0,308	0,49
10,0	0,0154	0,0221	0,0451	0,062	0,372	0,60

4. Взаємодія нейтронів з речовиною

Через відсутність електричного заряду нейтрони практично не взаємодіють з електронними оболонками атомів. Вив, що обумовлює їх високу проникаючу здатність, тобто, нейтрони можуть проходити через товсті шари речовини з мінімальними втратами.

Ця ж обставина дозволяє нейтронам при будь-яких енергіях зближуватися з атомними ядрами і вступати з ними у взаємодії.

Основними процесами, що приводять до ослаблення потоку (пучка) нейтронів), є процеси радіаційного захоплення, (поглинання) і розсіяння нейтронів при зіткненні з ядрами атомів.

Роль того чи іншого процесу в ослабленні нейтронного випромінювання істотно залежить від енергії налітають нейтронів.

Тому зазвичай нейтрони ділять на окремі енергетичні групи – теплові, повільні і швидкі нейтрони. Межі цих енергетичних груп умовні (Таюлиця).

Таблиця 7. Класифікація нейтронів за енергією

Типи нейтронів	Енергія нейтронів, еВ
Ультра холодні	$<10^{-6}$
Холодні (повільні)	$10^{-6} - 0,005$
Теплові	$0,005 - 0,5$
Надтеплові	$0,5 - 10^3$
Резонансні	$10^3 - 10^5$
Швидкі	$10^5 - 10^8$
Надшвидкі	$> 10^8$

4.1. Взаємодія швидких нейтронів з речовиною

Для швидких нейтронів найбільш важливим результатом взаємодії є пружні (n, n) та непружні ($n, n' \gamma$) зіткнення з атомними ядрами.

При пружному зіткненні нейтронів з ядром змінюється тільки напрям руху нейтрона

При непружному зіткненні частина кінетичної енергії нейтрона та ядра витрачається на збудження ядра з подальшим випусканням γ -квантів.

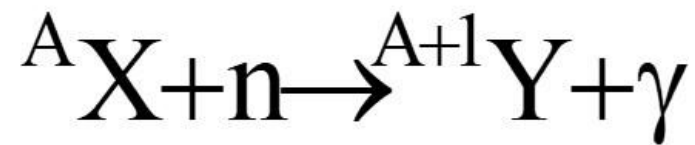
Непружне розсіювання можливо на будь-якому ядрі, що має збуджені рівні, тобто практично на всіх ядрах за винятком ядер водню, гелію, дейтерію.

Швидкі нейтрони багаторазово розсіюючись на ядрах, зменшують свою енергію до теплових нейтронів.

Цей процес називається уповільненням швидких нейтронів

4.2. Радіаційне захоплення повільних та теплових нейтронів

Для повільних та теплових нейтронів основним процесом, що визначає послаблення нейтронного потоку, є радіаційне захоплення (поглинання) нейтрону ядром атома середовища-мішені:



4.3. Розщеплення (примусовий поділ) ядра

При взаємодії повільних нейтронів з важкими ядрами можливий також процес розщеплення ядра, тобто примусовий поділ ядра на два або більше осколків.

4.4. Ослаблення пучка нейтронів

У кожному акті взаємодії нейтрон або змінює напрямок руху і кінетичну енергію, або поглинається ядром.

При цьому нейтрон вибуває з паралельного пучка, тому такий пучок слабшає за експонентним законом:

$$N_x = N_0 e^{(-n_A \cdot \sigma \cdot x)}$$

де N_0 – число нейтронів в падаючому пучку ;

N_x – число нейтронів, що не зазнали жодного зіткнення з ядрами речовини ; n_A – число ядер в 1м^3 речовини-мішені, $n_A = 6.02 \cdot 10^{23} \cdot \rho / A$; ρ (кг/м³); x – товщина шару речовини (м).

σ_n – повний ефективний мікроскопічний перетин взаємодії нейтронів з ядрами.

4.5. Повний ефективний мікроскопічний перетин

Імовірність проходження тієї чи іншої реакції визначається повним ефективним мікроскопічним перетином σ_p взаємодії нейтронів з ядрами.

Мікроскопічний перетин σ_p можна уявити як перетин сфери, описаної навколо ядра.

Перетинаючи цю сферу, нейтрон може вступити в реакцію з ядром :

$$r = \sqrt{\sigma / \pi}$$

4.6. Пропускання нейтронів шаром речовини

Повний ефективний перетин має розмірність площі. Одиницею вимірювання поперечного переректину є барн, $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$.

Чим більше σ_n , тим імовірніше взаємодія нейтрона з ядром.

Залежно від типу ядра і енергії налітаючого нейтрона величина перетину змінюється в інтервалі кількох барн.

Відношення:

$$N_x/N_0 = e^{(-n_0 \sigma_i \delta)} = T$$

називають пропусканням T нейтронів шаром речовини.

4.7. Макроскопічний перетин

Добуток $\sigma_n \cdot n_0$ називається макроскопічними перетином взаємодії або лінійним коефіцієнтом ослаблення нейтронів позначається Σ і виражається в м^{-1} .

Виходячи з цього визначення можна записати:

$$N_x = N_0 \cdot e^{(-\Sigma \cdot x)}$$

4.8. Довжина вільного пробігу нейтронів

Відношення:

$$1/\Sigma = \lambda,$$

має розмірність довжини і являє собою товщину, послаблення потоку нейтронів в λ раз.

Цю величину прийнято називати довжиною вільного пробігу нейтронів даної енергії в даній речовині.

Так як σ_n , зі збільшенням енергії нейтрона зменшується, то довжина вільного пробігу збільшується.

Таблиця 8. Довжина вільного пробігу швидких нейтронів (λ) в різних середовищах

Матеріал	Щільність, г/см ³	λ (см) за енергії:	
		4 MeV	14,9 MeV
Поліетилен	0,92	5,5	13,9
Плексиглас	1,18	6,3	15,2
Карбід бору	1,67	12,0	17,2
Графіт	1,6Т	11,4	24,0
Алюміній	2,7	14,1	15,9
Залізо	7,89	7,6	8,3
Свинець	11,34	15,0	15,5

ТЕМА 6

Радіаційна хімія

Тема 6

- Радіаційна хімія
- Поглинена доза
- Радіаційно-хімічний вихід
- Основні види радіаційно-хімічних перетворень
- Вільні радикали
- Первинні радіаційно-хімічні процеси (збудження)(10^{-13} – 10^{-15} с)
- Первинні радіаційно-хімічні процеси (іонізація)
- Вторинні радіаційно-хімічні процеси
- Процес передачі енергії
- Радіаційно-хімічні реакції, що протікають у воді і водних розчинах
- Радіоліз води

Радіаційна хімія

Радіаційна хімія – розділ хімії, що вивчає хімічні перетворення, що відбуваються в речовині внаслідок поглинання енергії іонізуючих випромінювань.

Загальною закономірністю при проходженні випромінювання через речовину є залежність поглиненої енергії на одиницю довжини пробігу частинки від концентрації електронів середовища:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 e^4}{m v^2} \phi(v, \bar{I})$$

де $\phi(v, \bar{I})$ – деяка функція від швидкості частинки і середнього потенціалу іонізації речовини.

Величина $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$ – називається лінійною передачею енергії (ЛПЕ). ЛПЕ позначається (L_{Δ}).

Поглинена доза

Дія іонізуючого випромінювання на речовину пропорційна поглиненій в системі радіаційної енергії, яка зазвичай називається дозою випромінювання.

Поглинена доза чисельно дорівнює відношенню кількості поглиненої енергії в елементарному обсязі, віднесеної до одиниці маси речовини, що опромінюється в цьому обсязі:

$$D = \frac{dE_D}{dm} = \frac{dE_D}{\rho dV}$$

Радіаційно-хімічний вихід

Основною кількісною характеристикою радіаційно-хімічного перетворення є радіаційно-хімічний вихід G , який є числом молекул, іонів, атомів, вільних радикалів та інших продуктів (N), що утворюються (або витрачаються) при поглинанні речовиною 100 еВ енергії іонізуючого випромінювання:

$$G = \frac{N}{100\text{эВ}}$$

У дужках при букві G , записують символ з'єднання, про який йде мова, наприклад, вихід водню позначають $G(\text{H}_2)$.

Основні види радіаційно-хімічних перетворень

Ми розглянемо тільки ті хімічні перетворення, які обумовлені розсіюванням енергії випромінювань на електронах атомів і молекул.

Розкладання вихідних хімічних сполук та утворення нових, внаслідок поглинання енергії іонізуючого випромінювання, називається радіолізом.

Взаємодія з речовиною будь-якого виду випромінювання пов'язана з утворенням вторинних електронів, від яких молекули середовища отримують до 80% усієї енергії, що поглинається.

Тому механізм радіаційно-хімічних процесів майже не залежить від виду випромінювання.

Дія випромінювання зводиться до іонізації та збудження атомів або молекул речовини.

Вільні радикали

Як іонізація, так і збудження молекули можуть призвести до її дисоціації на вільні радикали.

Вільні радикали – це частинки, що володіють неспареними електронами на зовнішній електронній оболонці.

Наявність неспарених електронів надає вільним радикалам забарвлення, парамагнетизм і високу хімічну активність.

Тому вільнорадикальних механізм має для радіаційної хімії велике значення.

Вільні радикали зазвичай позначають крапкою, наприклад:



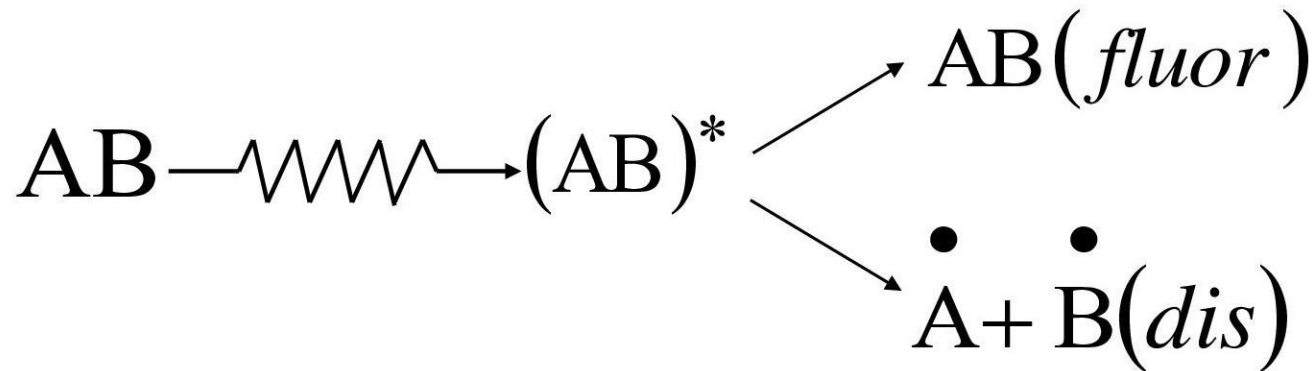
Первинні радіаційно-хімічні процеси (збудження) (10^{-13} – 10^{-15} с)

При поглинанні енергії молекулами АВ відбуваються процеси, які можна розділити на первинні і вторинні.

Первинні процеси тривають 10^{-13} – 10^{-15} с з моменту поглинання енергії.

У ці процеси входять збудження та іонізація молекул (атомів):

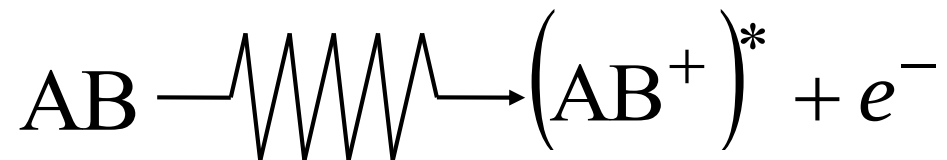
а) збудження молекул (атомів) середовища:



Збуджені молекули зазнають розпад на стійкі молекули або радикали шляхом флуоресценції або конверсії енергії електронів в коливальну енергію молекули в результаті міжмолекулярної передачі енергії.

Первинні радіаційно-хімічні процеси (іонізація)

б) іонізація молекул середовища з утворенням молекулярного іона:

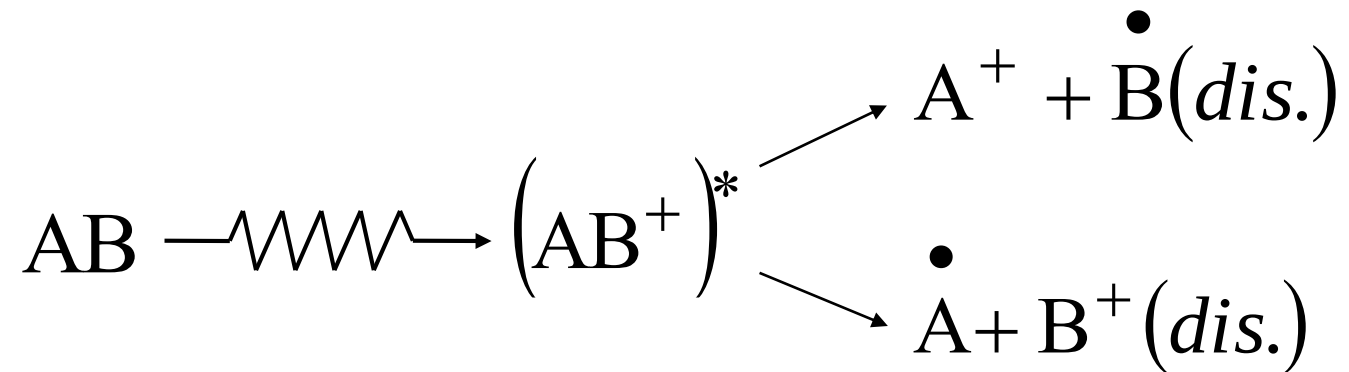


Далі позитивні іони, збуджені молекули і електрони з тепловими швидкостями беруть участь у вторинних процесах.

Вторинні радіаційно-хімічні процеси

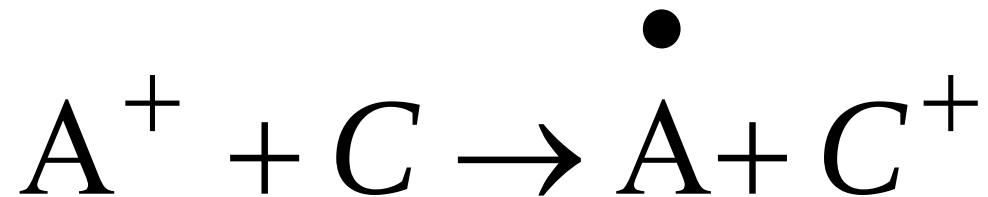
У вторинні радіаційно-хімічні процеси входять:

а) розпад нестійких молекулярних іонів на вільні радикали та іони:



Вторинні радіаційно-хімічні процеси

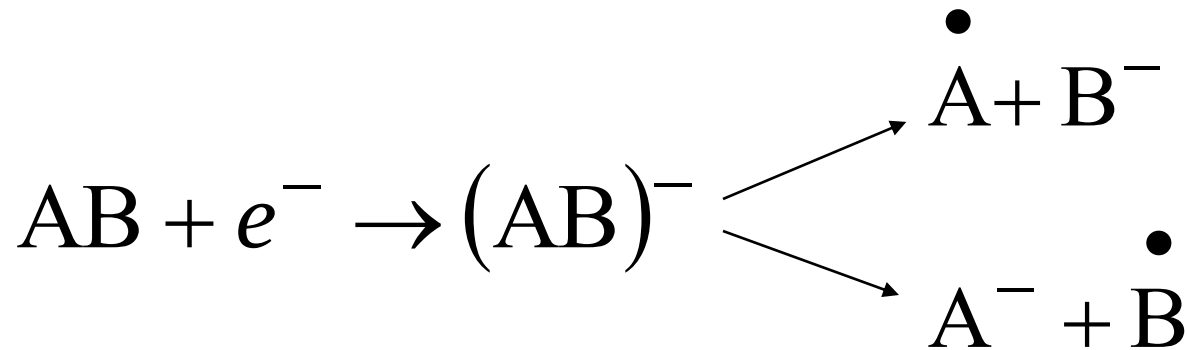
б) Позитивно заряджені іони вступають в іон-молекулярні реакції з оточуючими молекулами середовища з утворенням радикалів, наприклад:



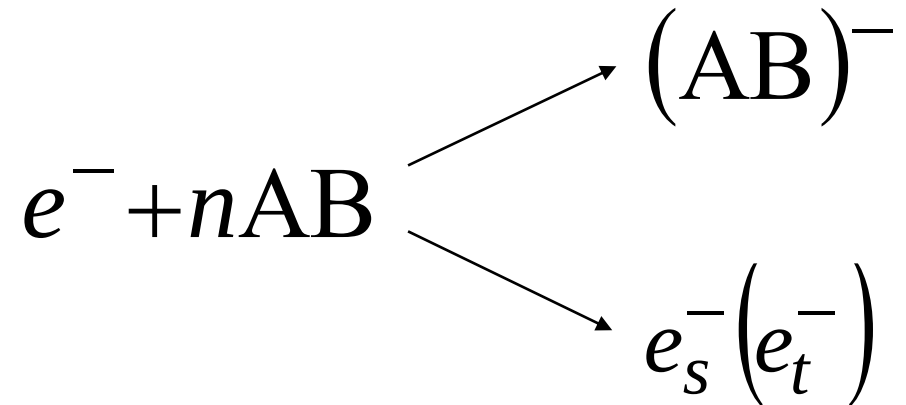
Вторинні радіаційно-хімічні процеси

в) Електрони після втрати енергії до значень, менших потенціалу іонізації та електронного збудження середовища можуть:

1) захоплюватися молекулами, що мають велику спорідненість до електрону, іноді з їх дисоціацією:



2) утворення сольватованих (e_s) або захоплених електронів (e_t):



У рідкому середовищі утворюється e , а в твердій - e .

Процес передачі енергії

Реакції, які відбуваються з моменту появи первинних активних форм до утворення кінцевих стабільних молекул, називають процесом передачі енергії внаслідок прямої дії іонізуючого випромінювання.

Жодна з наведених вище реакцій не є абсолютно специфічною для радіаційної хімії.

Ці реакції можуть відбуватися при впливі квантів оптичної частоти, в електричному розряді, при дії повільних електронів в іонному джерелі мас-спектрометра, в кавітаційних порожнинах всередині рідини, що створюються ультразвуковим полем, і т.д.

Для ідентифікації та кількісного визначення продуктів радіолізу поряд зі звичайними хімічними методами широко застосовують методи ІКС, ЕПР, ЯМР, методи реєстрації флуоресценції і хемілюмінісценції і ін.

Радіаційно-хімічні реакції, що протікають у воді і водних розчинах

Радіаційно-хімічні реакції, що протікають у воді і водних розчинах, становлять інтерес з двох причин.

- По-перше, вода застосовується в ядерних реакторах як сповільнювач нейтронів і теплоносія.

У водних розчинах здійснюються багато процесів, пов'язані з виробництвом зброї та виділенням продуктів ядерного ділення.

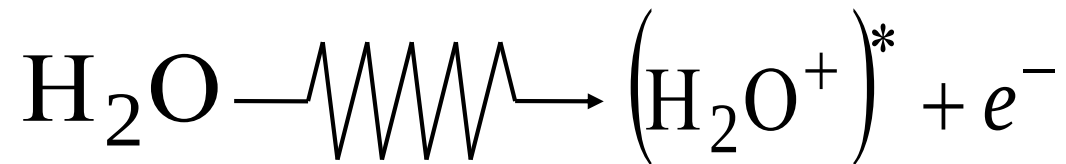
- По-друге, існує велика схожість в радіаційно-хімічній поведінці водних розчинів і біологічних систем.

Тому дослідження впливу іонізуючих випромінювань на водні розчини може служити основою для оцінки дії радіації на живі тканини.

Радіоліз води

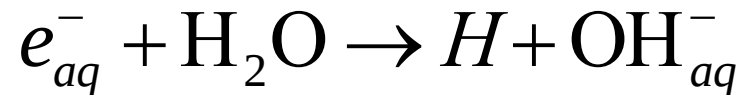
Первинні процеси:

- іонізація молекул води і їх збудження (10^{-18} – 10^{-16} с):

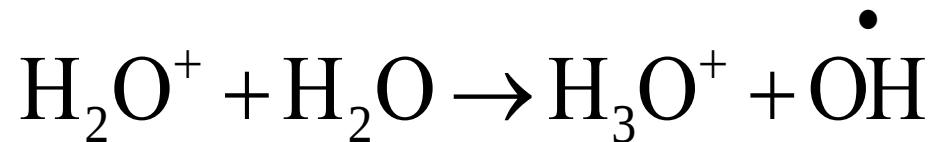
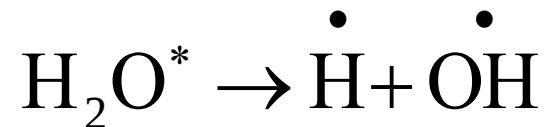


Утворення радикалів $\dot{H}$ і $\dot{OH}$

Вибиті електрони після уповільнення сольватуються і потім взаємодіють з водою з утворенням атомарного водню:

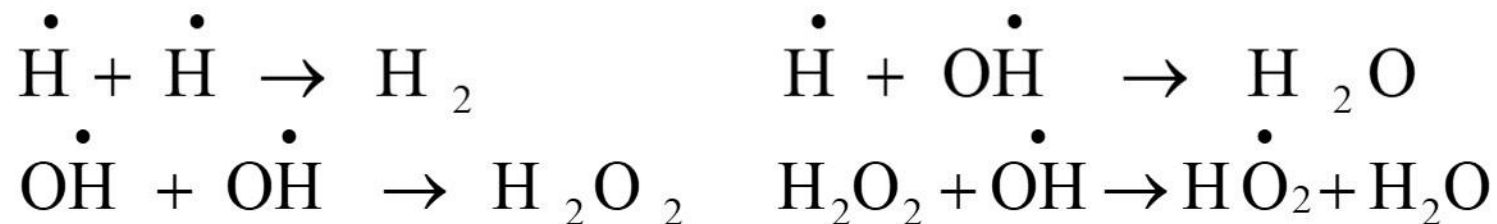


Вторинні реакції іонів та збуджених молекул води призводять до утворення радикалів $\dot{OH}$ і $\dot{H}$ (10^{-12} – 10^{-11} с):

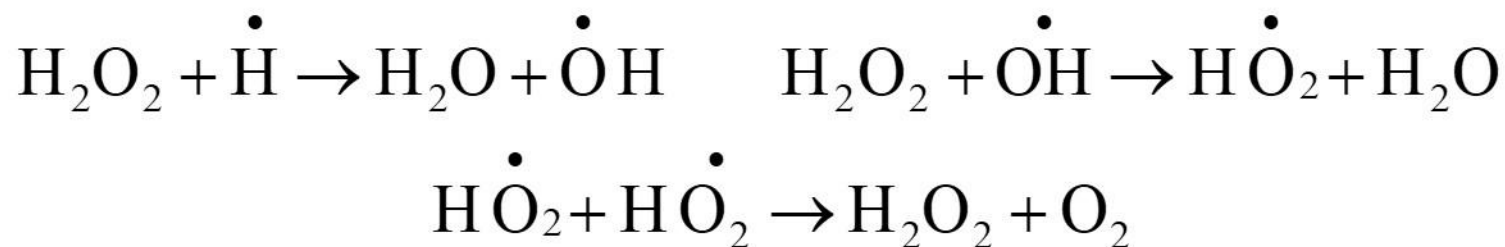


Молекулярні продукти радіолізк води

Утворені радикали в місцях їх високої концентрації вступають у взаємодію один з одним і рекомбінують:



Серед кінцевих продуктів радіолізу води є і O_2 , особливо багато його утворюється при впливі на воду іонізуючого випромінювання з високою ЛПЕ



Радіоліз органічних сполук

Механізм радіаційно-хімічних реакцій з органічними сполуками незрівнянно більш складний, ніж для простих реакцій в газовій фазі або реакцій у водному розчині, внаслідок різноманітності класів органічних сполук

При радіолізі органічних сполук відбувається розрив зв'язків C - C, C - H і зв'язків вуглецю з функціональними групами.

В результаті з'являються радикали декількох типів, при взаємодії яких утворюються сполуки як з меншим, так і з більшим числом вуглецевих атомів, ніж у вихідній молекулі.

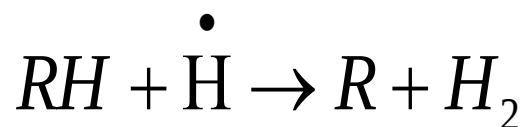
Відбувається дегідрування з утворенням водню та сполук з подвійним зв'язком.

Радіоліз органічних сполук

Основним газоподібним продуктом радіолізу вуглеводнів, є водень, другим продуктом радіолізу є ненасичені органічні сполуки

Є два шляхи утворення водню:

1) радикальний:

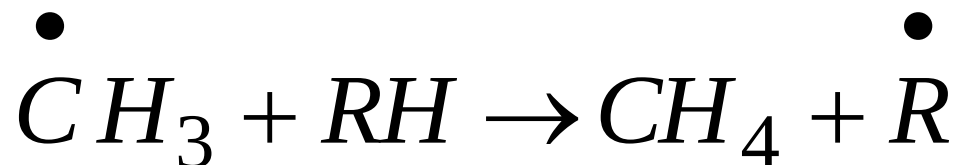


2) молекулярний, утворюється водень і ненасичені органічні сполуки



Радіоліз органічних сполук

Другий обов'язковий продукт радіолізу вуглеводнів – метан. Він утворюється з кінцевих груп:



Радіоліз полімерів

При поглинанні енергії випромінювання полімерами як первинні продукти утворюються іони, вільні електрони і збуджені частинки.

Вторинними продуктами радіолізу полімерів є радикали і іонного радикали, що утворюються при взаємодії іонів, а також при розпаді порушених іонів і молекул

Відмінності полягають в тому, що порівняно невелика опромінення викликає помітну зміну властивостей полімерів. Так, при опроміненні поліетилену дозою 10^4 Гр в 1 см^3 відбувається $6,24 \cdot 10^{17}$ змін, тобто 30% молекул піддаються зміні в результаті впливу випромінювання.

Радіаційно-хімічні перетворення полімерів

До основних радіаційно-хімічних перетворень полімерів відносяться:

1 – «зшивання» (утворення поперечних міжмолекулярних зв'язків);

2 – деструкція (розрив зв'язків в головних ланцюгах і утворення молекул меншої довжини);

Зшивання і деструкція є незворотними радіаційно-хімічними процесами, в результаті яких відбуваються найбільш істотні зміни структури і як наслідок властивостей полімерів

Зазвичай зшивання та деструкція протікають одночасно.

Співвідношення швидкостей цих процесів залежить від хімічної структури полімеру, його фізичної будови, умов опромінення.

Полімери поділяються на ті, що переважно зшиваються і переважно деструкуються.

Радіаційно-хімічні перетворення полімерів

1. Зшивання

При зшиванні лінійний полімер перетворюється в просторовий і його молекулярна маса зростає.

Це призводить до нерозчинності полімеру в органічних розчинниках, підвищенню механічної міцності

Це явище знаходить широке використання в практиці.

Наприклад, при опроміненні каучуків внаслідок зшивання відбувається їх перетворення в гуму (радіаційна вулканізація).

Радіаційно-хімічна технологія зшивання полімерів є основою промислових виробництв електроізоляції кабелів і проводів з поліетилену і полівінілхлориду та інших виробів головним чином на основі поліетиленгліколю.

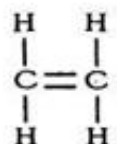
Дози, необхідні для зшивання, наприклад поліетиленової ізоляції кабелю і термоусадочні плівки складають 0,1–0,4 МГр.

2. Деструкція

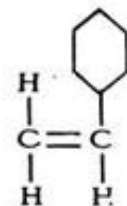
При деструкції молекулярна маса полімеру зменшується.

Мономерні ланки та утворені з них полімери

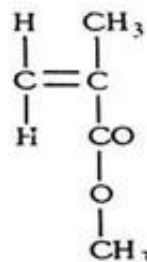
Мономерна ланка



Етилен

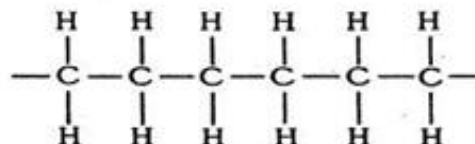


Стирол

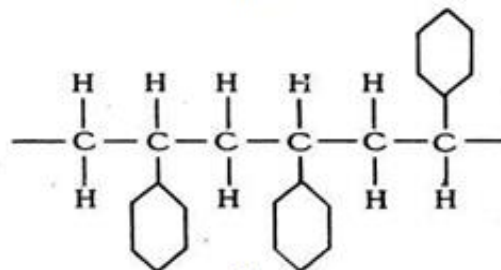


Метилметакрилат

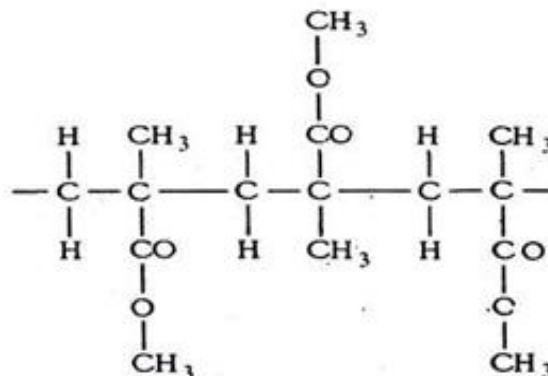
Полімер



Поліетилен



Полістирол



Поліметилметакрилат

Радіоліз водних розчинів ДНК

Всі процеси, що відбуваються при опроміненні ДНК, обумовлені в основному взаємодією ДНК з сольватованим електроном e_s^- , $\dot{H}$ і $\dot{OH}$.

Радикали вступають в окислювально-відновні реакції з фрагментами ДНК

При радіолізі водних розчинів ДНК протікають два головних піоцесу – деполімеризацвя і перетворення азотистих сполук біополімера.

Деполімеризація ДНК проявляється у зменшенні молекулярної маси біополімеру та в'язкості розчину.

Одночасно зі зменшенням молекулярної маси відбувається розрив водневих зв'язків.

Цей процес є причиною денатурації ДНК.

У присутності кисню з'являються гідроперекиси.

Радіоліз водних розчинів білків

Радіаційно-хімічні перетворення білкових молекул визначаються, перш за все, дією радіації на амінокислоти.

Основні процеси, що протікають при опроміненні водних розчинів білків: деструкція поліпептидного зв'язку з утворенням низькомолекулярних продуктів, виникнення зшивок, реакцій радикальних продуктів радіолізу води з бічними відгалуженнями амінокислотних залишків поліпептидного ланцюга, інактивація ферментів і денатурація.

Радіаційна стійкість матеріалів

Радіаційною стійкістю називається здатність речовин зберігати свої характеристики, наприклад фізико-механічні, електричні та інші, під впливом радіації. Ці властивості можуть змінюватися через зміщення атомів речовини в кристалічній решітці, реакції ядер атомів, розриву хімічних зв'язків та інших факторів.

Радіаційна стійкість деяких матеріалів ядерної енергетики

В обладнанні атомних електростанцій широко використовують в якості ізоляційних і захисних матеріалів проводів і кабелів полімерні матеріали, а гуми – як ущільнювачі.

Зміцнення металів і сплавів, що проходить при опроміненні, призводить до зниження їх пластичності і в результаті до крихкості.

Опромінення нейтронами металу призводить до збільшення обсягу (радіаційне розпухання), яке може досягати 10–20 %.

Матеріал	Доза, Гр гамма-випромінювання	Швидкі нейтрони, н/см ²
Неорганвчні матеріали		
Скло	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{17}$
Кераміка	$5 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^{20}$	$10^{20} - 3 \cdot 10^{20}$
Сталь конструкційна	$5 \cdot 10^7$	$> 10^{19}$
Бетон	—	$10^{20} - 5 \cdot 10^{20}$
Графіт	$5 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$	—
Органічні матеріали		
Натуральний каучук	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$	—
Поліуретанові каучуки	$10^4 - 3 \cdot 10^5$	—
Фенольні смоли: наповнювач — скловолокно	$3 \cdot 10 - 10^8$	—
Епоксидна смола	$10^6 - 2 \cdot 10^7$	—
Полістирол	$5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$	—
Полівинилхлорид	$10^6 - 10^7$	—
Полиетилен	$10^5 - 10^6$	—