

§ 40. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ОСНОВНИЙ ЗАКОН РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ



Алхіміки Середньовіччя мріяли про філософський камінь, який перетворював би всі речовини на золото. «Сучасна алхімія» — так назвав Е. Резерфорд свою книгу про перетворення атомних ядер. Про те, які зміни відбуваються з ядром під час радіоактивного випромінювання, йтиметься в цьому параграфі.

1 Згадуємо історію відкриття радіоактивності

Історія відкриття радіоактивності почалася з відкриття рентгенівського випромінювання. Поштовхом до досліджень стало припущення, що рентгенівське випромінювання може виникати при флуоресценції деяких речовин, опромінених сонячним світлом. Такою речовиною і скористався французький фізик *Анрі Антуан Беккерель* (1852–1908) у лютому 1896 р. Для досліджень він випадково обрав здатну до флуоресценції маловідому сіль Урану.

Знаючи, що рентгенівські промені, на відміну від світлових, проходять крізь чорний папір, учений поклав на загорнуту в чорний папір фотопластинку крупинки уранової солі й виніс на сонячне світло. Після проявлення на фотопластинці виявилися темні плями саме в тих місцях, де лежала уранова сіль. Таким чином було з'ясовано, що *уранова сіль дійсно висилає випромінювання, яке має велику проникну здатність*.

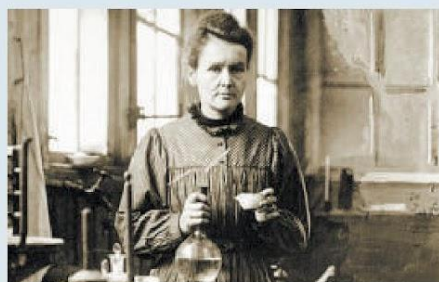
Продовжити дослідження Беккерелю завадила хмарна погода, і він поклав готову до досліду фотопластинку з урановою сіллю та мідним хрестом між ними в шухляду стола. Через три дні учений вирішив проявити фотопластинку. Результат був несподіваним: на пластинці з'явився контур хреста. Тож сонячне світло було ні до чого: *сіль Урану сама, без впливу зовнішніх факторів, висилає невидиме випромінювання*.

Пізніше таке випромінювання назвуть **радіоактивним випромінюванням**; *здатність речовин до радіоактивного випромінювання — радіоактивністю*; *нукліди, ядра яких мають таку здатність, — радіонуклідами*.

Відкриття Радію

Термін радіоактивність був уведений у науку *Марією Склодовською-Кюрі* (1867–1934). «Чи тільки Уран висилає “промені Беккереля”?» — з пошуку відповіді на це запитання почала вона свою роботу з вивчення радіоактивності. У 1898 р. М. Склодовська-Кюрі та її чоловік *П'єр Кюрі* (1859–1906) відкрили два нові елементи — Радій і Полоній. Радій виявився в мільйони разів активнішим за уран, але отримати цю речовину в достатній для дослідів кількості виявилось досить складно. Знадобилося ще 4 роки копіткої роботи (майже вручну подружжям було оброблено 11 т руди!), щоб отримати крихітну пробірку радію.

За дослідження радіоактивності подружжя Кюрі разом із А. Беккерелем отримали в 1903 р. Нобелівську премію з фізики, а в 1911 р. Марія Склодовська-Кюрі одержала ще й Нобелівську премію з хімії. За всю історію тільки чотири особи ставали лауреатами Нобелівської премії двічі.



2

Природа радіоактивного випромінювання

Досліди з вивчення природи радіоактивного випромінювання показали, що різні радіонукліди можуть випромінювати *промені трьох видів*:

1) α -випромінювання — позитивно заряджені важкі частинки (ядра атомів Гелію);

2) β -випромінювання: β^- -випромінювання — негативно заряджені легкі частинки (швидкі електрони), β^+ -випромінювання — позитивно заряджені легкі частинки (швидкі позитрони);

3) γ -випромінювання — високочастотні електромагнітні хвилі.

На рис. 40.1 подано схему одного з таких дослідів: пучок радіоактивного випромінювання потрапляє спочатку в сильне магнітне поле постійного магніту, а потім на фотопластинку. Після проявлення фотопластинки на ній чітко видно три темні плями, які свідчать про те, що урановий зразок випромінює промені трьох видів.

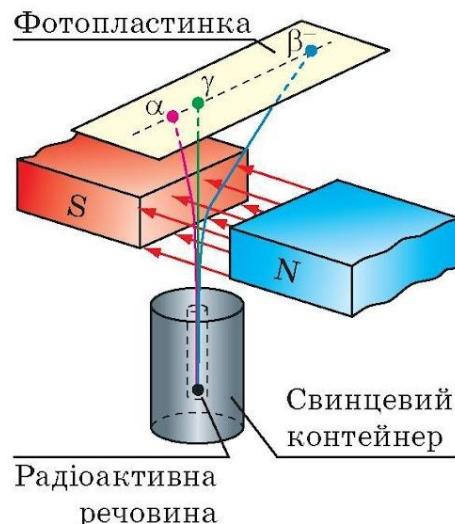


Рис. 40.1. Схема дослідів з вивчення природи радіоактивного випромінювання: урановий зразок ($^{238}_{92}\text{U}$ і $^{235}_{92}\text{U}$ у суміші з їх дочірніми радіонуклідами) є джерелом α -, β^- -, γ -випромінювань

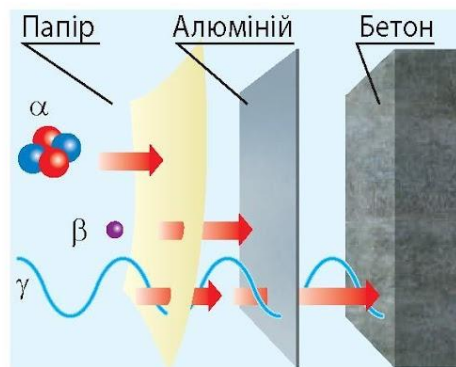
Види радіоактивного випромінювання

α -випромінювання	β^- -випромінювання	β^+ -випромінювання	γ -випромінювання
Потік α -частинок — ядер атомів Гелію ^4_2He , які рухаються зі швидкістю порядку 10^7 м/с. $q_\alpha = +2e \approx 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m_\alpha \approx 4,0$ а.о.м $\approx 6,6 \cdot 10^{-27}$ кг	Потік β^- -частинок — електронів $^0_{-1}e$, які летять зі швидкістю, наближеною до швидкості світла. $q(\beta^-) = -e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m_e \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ а.о.м $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	Потік β^+ -частинок — позитронів $^0_{+1}e$, які летять зі швидкістю, наближеною до швидкості світла. $q(\beta^+) = -e \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m(e^+) \approx 5,5 \cdot 10^{-4}$ а.о.м $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	γ -випромінювання — електромагнітні хвилі надзвичайно високої частоти (понад 10^{18} Гц). Швидкість поширення цих хвиль у вакуумі становить $3 \cdot 10^8$ м/с.

Радіоактивне випромінювання не фіксується органами чуття людини, проте може призвести до згубних наслідків. Простіше за все захиститися від α - і β -випромінювань: щоб зупинити α -частинки, достатньо тонкого аркуша паперу (0,1 мм); β -випромінювання повністю поглинається, наприклад, алюмінієвою пластинкою завтовшки 1 мм. Найбільш небезпечним для людини є γ -випромінювання.



Які методи захисту від радіаційного випромінювання ви знаєте?



Як захиститися від радіоактивного випромінювання

Дізнавшись про викид радіоактивних речовин, слід зробити, зокрема, таке.

1. Сховатися в будівлі: бетонні й цегляні стіни повністю захищають від α - і β -випромінювання й добре поглинають γ -випромінювання.
2. Зачинити всі вікна, двері, вентиляційні ґратки.
3. Зняти вуличний одяг, запакувати його в поліетиленовий пакет, прийняти душ.
4. Герметично запакувати запас питної води, їжі.
5. Намагатися вживати йодомісткі продукти (горіхи, морські водорості тощо), продукти, багаті на клітковину.

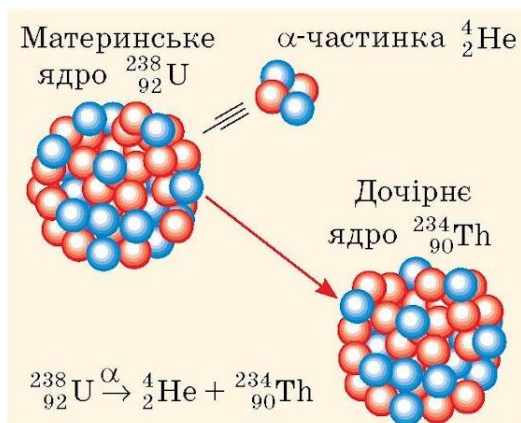


Рис. 40.2. Під час α -розпаду материнське ядро спонтанно розпадається на дві частини: α -частинку і дочірнє (нове) ядро

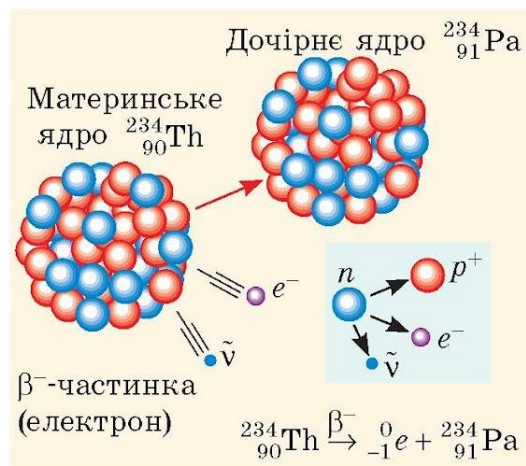


Рис. 40.3. Під час β^- -розпаду один із нейтронів материнського ядра перетворюється на протон, електрон й електронне антинейтрино:

$^1_0n \rightarrow ^1_1p + ^0_{-1}e + ^0_0\bar{\nu}$; електрон і антинейтрино випромінюються, протон залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

3 Правила зміщення

Вивчення радіоактивності показало, що *радіоактивне випромінювання є наслідком перетворень ядер атомів*. Причому ці перетворення відбуваються *довільно (без зовнішніх причин)*, їх не можна прискорити або сповільнити, вони не залежать від зовнішнього впливу, тобто на них не впливають зміни тиску і температури, дії магнітного й електричного полів, хімічні реакції, зміна освітленості тощо.

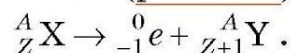
Радіоактивність — здатність ядер радіонуклідів довільно перетворюватися на ядра інших елементів із випромінюванням мікрочастинок.

Випромінюючи α - чи β -частинки, вихідне (материнське) ядро перетворюється на ядро атома іншого елемента (дочірнє ядро); α - і β -розпади можуть супроводжуватися γ -випромінюванням. Після низки експериментів було встановлено загальні правила таких перетворень — **правила зміщення**:

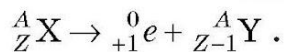
1. Під час α -розпаду кількість нуклонів у ядрі зменшується на 4, протонів — на 2, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на 2 одиниці менший від порядкового номера вихідного елемента (рис. 40.2):



2. Під час β^- -розпаду кількість нуклонів у ядрі не змінюється, а кількість протонів збільшується на 1, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на одиницю більший за порядковий номер вихідного елемента (рис. 40.3):



3. Під час β^+ -розпаду кількість нуклонів у ядрі не змінюється, а кількість протонів зменшується на 1, тому утворюється ядро елемента, порядковий номер якого на одиницю менший за порядковий номер вихідного елемента (рис. 40.4):



? Ядро якого елемента утвориться внаслідок β^+ -розпаду ядра Радію ${}^{228}_{88}\text{Ra}$?

Зверніть увагу! Під час β -розпаду окрім електрона (або позитрона) з ядра вилітає ще одна частинка — **антинейтрино** або **нейтрино**. Через дуже малу масу і відсутність заряду ці частинки дуже слабо взаємодіють із речовиною, і це утруднює їх виявлення в експерименті (див. § 43).

4 Основний закон радіоактивного розпаду

Візьмемо закриту скляну колбу, що містить певну кількість Радону-220, — він є радіоактивним, і його ядра спонтанно розпадаються з випромінюванням α -частинок. А чи можна дізнатися, яке саме ядро розпадеться першим? А яке останнім? Ні, дізнатися про це неможливо: *розпад того чи іншого ядра радіонукліда — подія випадкова*. Водночас поведінка будь-якої радіоактивної речовини підлягає чітко визначеній закономірності: кожний радіонуклід має власний *період піврозпаду* (див. таблицю). Так, у наведеному випадку, приблизно за 55,6 с кількість радону в колбі зменшиться вдвічі. Ще через 55,6 с із решти залишиться теж половина і т. д. Таким чином, інтервал часу 55,6 с є періодом піврозпаду Радону-220.

Період піврозпаду $T_{1/2}$ — це фізична величина, що характеризує радіонуклід і дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер даного радіонукліда.

Одиниця періоду піврозпаду в СІ — **секунда**: $[T_{1/2}] = 1 \text{ с (s)}$.

Нехай у початковий момент часу радіонуклідний зразок містить N_0 ядер деякого радіонукліда. Унаслідок радіоактивного розпаду кількість цих ядер із часом буде зменшуватися. Через час t_1 , що дорівнює періоду піврозпаду

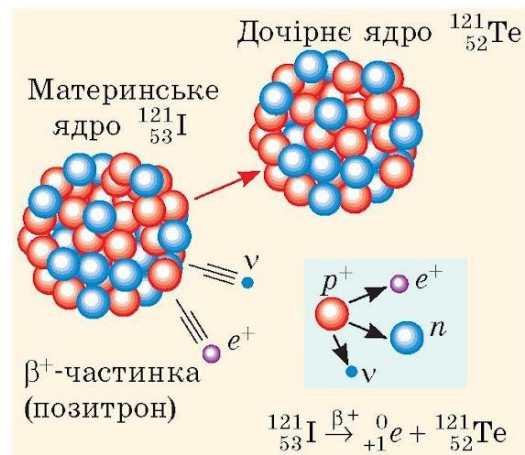


Рис. 40.4. Під час β^+ -розпаду один із протонів материнського ядра перетворюється на нейтрон, позитрон й електронне нейтрино: ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0e + {}_0^0\nu$; позитрон і нейтрино випромінюються, нейтрон залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

Період піврозпаду деяких радіоактивних нуклідів

Радіонуклід	Період піврозпаду
Йод-131	8 діб
Калій-40	1,25 млрд років
Карбон-14	5700 років
Кобальт-60	5,3 року
Плутоній-239	24 тис. років
Радій-226	1600 років
Радон-220	55,6 секунди
Радон-222	3,8 доби
Стронцій-89	50,5 доби
Стронцій-90	28,9 року
Уран-235	0,7 млрд років
Уран-238	4,5 млрд років
Цезій-137	30 років

($t_1 = T_{1/2}$), кількість ядер, що не розпалися, зменшиться вдвічі: $N_1 = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot 2^{-1}$; ще через період піврозпаду ($t_2 = 2T_{1/2}$) із решти ядер залишиться теж половина: $N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0 \cdot 2^{-1}}{2} = N_0 \cdot 2^{-2}$; через час $t_3 = 3T_{1/2}$ кількість ядер дорівнюватиме: $N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0 \cdot 2^{-2}}{2} = N_0 \cdot 2^{-3}$. Отже, через n періодів піврозпаду ($t = nT_{1/2}$) у зразку залишиться $N = N_0 \cdot 2^{-n}$ ядер радіонукліда (рис. 40.5).

Урахувавши, що $n = \frac{t}{T_{1/2}}$, маємо **основний закон радіоактивного розпаду**:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

де N — кількість ядер радіонукліда, що залишились у зразку через час t ; N_0 — початкова кількість ядер; $T_{1/2}$ — період піврозпаду; t — час розпаду.

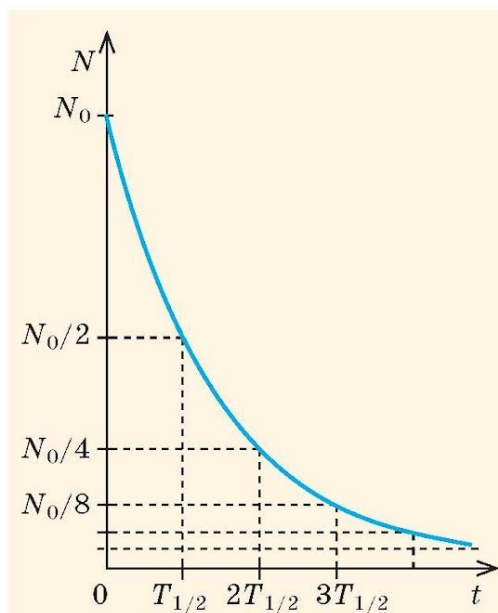


Рис. 40.5. Графік залежності кількості N ядер радіонукліда, які залишились в зразку, від часу t .

$T_{1/2}$ — період піврозпаду;
 N_0 — початкова кількість ядер

Зверніть увагу!

1 бекерель — це дуже мала активність, тому використовують позасистемну одиницю активності — **кюрі (Ки)**:

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

5 Активність радіонукліда

І Радон-220, і Радон-222 є α -радіоактивними (їхні ядра можуть спонтанно розпадатися на α -частинку і відповідне дочірнє ядро). Тож якщо кількість атомів Радону-220 і Радону-222 є однаковою, з якого зразка за 1 с вилетить більше α -частинок?

Фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості розпадів, що відбуваються в певному радіоактивному джерелі за секунду, називають **активністю A** радіоактивного джерела.

Одиниця активності в СІ — **бекерель**: $[A] = 1 \text{ Бк (Bq)}$.

1 Бк — це активність такого радіоактивного джерела, в якому за 1 с відбувається 1 акт розпаду: $1 \text{ Бк} = 1 \text{ розпад/с} = \text{с}^{-1}$.

Якщо зразок містить атоми лише одного радіонукліда, то активність цього зразка можна визначити за формулою:

$$A = \lambda N,$$

де N — кількість атомів радіонукліда в зразку на даний час; λ — **стала радіоактивного розпаду** — фізична величина, яка є характеристикою радіонукліда та пов'язана з періодом піврозпаду співвідношенням:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}; [\lambda] = \text{с}^{-1}.$$

Із часом у радіоактивному зразку кількість ядер радіонуклідів, що не розпалися, зменшується, тому зменшується й активність зразка (рис. 40.5).

6 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Визначте масу урану ($^{235}_{92}\text{U}$), який має таку саму активність, що й цезій ($^{137}_{55}\text{Cs}$) масою 2 мг.

Дано:

$$M(\text{U}) = 235 \text{ г/моль}$$

$$M(\text{Cs}) = 137 \text{ г/моль}$$

$$m(\text{Cs}) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ г}$$

$$A(\text{U}) = A(\text{Cs})$$

$$T_{1/2}(\text{U}) = 7 \cdot 10^8 \text{ років}$$

$$T_{1/2}(\text{Cs}) = 30 \text{ років}$$

$$m(\text{U}) = ?$$

Розв'язання. За формулою активності: $A = \lambda N$; де $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$.

Кількість N ядер радіонукліда дорівнює: $N = \frac{m}{M} N_A$, де N_A — стала Авогадро. Отже, активність кожного радіонукліда дорівнює: $A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} N_A$. За умовою $A(\text{U}) = A(\text{Cs})$, отже,

$$\text{маємо: } \frac{\ln 2}{T_{1/2}(\text{U})} \cdot \frac{m(\text{U})}{M(\text{U})} N_A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}(\text{Cs})} \cdot \frac{m(\text{Cs})}{M(\text{Cs})} N_A.$$

$$\text{Після скорочення: } \frac{m(\text{U})}{T_{1/2}(\text{U}) \cdot M(\text{U})} = \frac{m(\text{Cs})}{T_{1/2}(\text{Cs}) \cdot M(\text{Cs})} \Rightarrow m(\text{U}) = \frac{m(\text{Cs}) T_{1/2}(\text{U}) M(\text{U})}{T_{1/2}(\text{Cs}) M(\text{Cs})}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[m(\text{U})] = \frac{\text{г} \cdot \text{рік} \cdot \text{г} / \text{моль}}{\text{рік} \cdot \text{г} / \text{моль}} = \text{г}; \quad m(\text{U}) = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^8 \cdot 235}{30 \cdot 137} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ (г)}.$$

Відповідь: $m(\text{U}) = 80 \text{ кг}$.



Підбиваємо підсумки

- Більшість нуклідів, що існують у природі, є радіоактивними: їхні ядра довільно розпадаються, випромінюючи мікрочастинки та перетворюючись на інші ядра. Якщо ядро випромінює α -частинку (ядро атома Гелію), то кількість нуклонів у ядрі зменшується на 4, а протонів — на 2; якщо ядро випромінює β^- -частинку (електрон), то кількість протонів у ядрі збільшується на 1; якщо ядро випромінює β^+ -частинку (позитрон), то кількість протонів у ядрі зменшується на 1. І α -розпад, і β -розпад можуть супроводжуватися γ -випромінюванням — високочастотним електромагнітним випромінюванням.

- Період піврозпаду $T_{1/2}$ — це фізична величина, що характеризує радіонуклід і дорівнює часу, протягом якого розпадається половина наявної кількості ядер цього радіонукліда.

- Кількість ядер N , що залишилися у зразку через час t , визначає основний закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$.



Контрольні запитання

- Як було відкрито явище радіоактивності?
- Наведіть приклади природних радіоактивних елементів.
- Опишіть дослід із вивчення природи радіоактивного випромінювання.
- Наведіть означення радіоактивності.
- Які види радіоактивного випромінювання ви знаєте? Якою є їхня фізична природа? Звідки в ядрі беруться електрони?
- Як захиститися від радіоактивного випромінювання?
- Що відбувається з ядром атома під час випромінювання α -частинки? β -частинки?
- Дайте означення періоду піврозпаду.
- Що таке активність радіоактивного джерела? Чи змінюється вона з часом?



Вправа № 40

1. Під час радіоактивного розпаду з ядра $^{238}_{92}\text{U}$ випромінюється α -частинка. На ядро якого елемента перетворюється при цьому ядро Урану-238?
2. Ядро Натрію ($^{24}_{11}\text{Na}$), розпадаючись, випромінює електрон. Який це вид радіоактивного розпаду? Ядро якого елемента при цьому утворюється?
3. Період піврозпаду Радію-226 становить 1600 років. Скільки ядер цього радіонукліда розпадеться за 4800 років, якщо початкова кількість ядер Радію у зразку 10^9 ?
4. Період піврозпаду Цезію-137 становить 30 років. Скільки відсотків ядер цього радіонукліда розпадеться за 120 років?
5. В організмі людини вміст Калію становить приблизно 0,19 % її маси; радіоактивний нуклід Калію $^{40}_{19}\text{K}$ становить 0,012 % загальної кількості Калію. Скільки ядер цього радіонукліда розпадається за 1 секунду в організмі людини масою 100 кг?
6. Окрім зовнішнього існує небезпека внутрішнього опромінення: радіонукліди можуть потрапити в організм з їжею або водою. Дізнайтесь про причини підвищеної небезпеки цього опромінення та способи захисту від нього.

Джерело: Фізика. Підручник для 11 класу закладів загальної середньої освіти за ред. Бар'яхтара В.Г., Довгого С.О. – Харків, «Ранок», 2019р