

§ 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 речовою і скористався французький фізик *Анрі Антуан Беккерель* (1852–1908) у лютому 1896 р. Для дослідження 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 назустріч **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 виявилося 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.



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 висилає промені трьох видів.

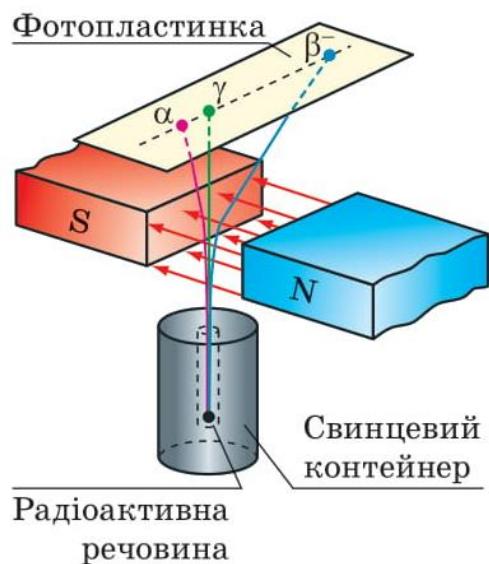
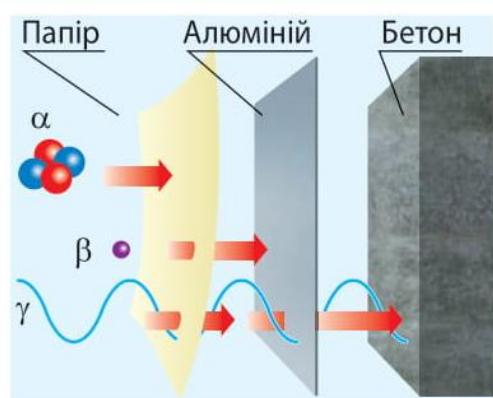


Рис. 40.1. Схема досліду з вивчення природи радіоактивного випромінювання: урановий зразок (^{238}U і ^{235}U у суміші з їх дочірніми радіонуклідами) є джерелом α -, β^- , γ -випромінювань

Види радіоактивного випромінювання			
α -випромінювання	β^- -випромінювання	β^+ -випромінювання	γ -випромінювання
Потік α -частинок — ядер атомів Гелію ${}_2^4\text{He}$, 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 ${}_{-1}^0 e$, 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 ${}_{+1}^0 e$, 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.

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

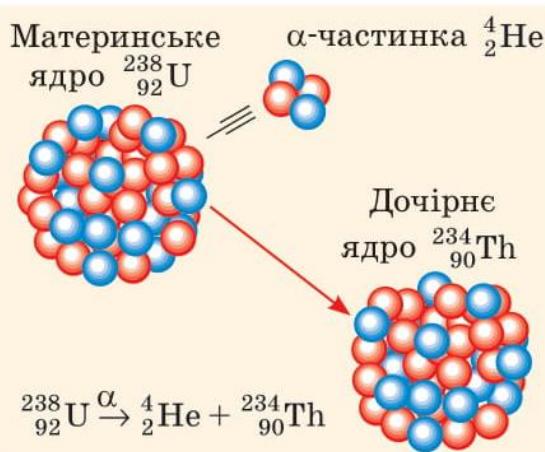


Рис. 40.2. Під час α -розпаду материнське ядро спонтанно розпадається на дві частини: α -частинку і дочірнє (нове) ядро

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**):

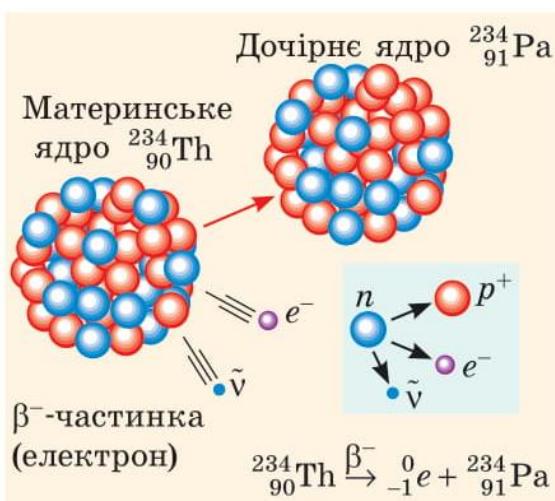
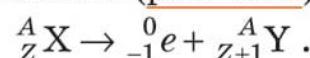
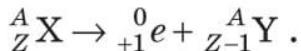


Рис. 40.3. Під час β^- -розпаду один із нейтронів материнського ядра перетворюється на протон, електрон й електронне антинейтрино:

${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}$; електрон і антинейтрино випромінюються, протон залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

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 частина — **антинейтрин** або **нейтрин**. Через дуже малу масу і відсутність заряду ці частинки дуже слабко 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.

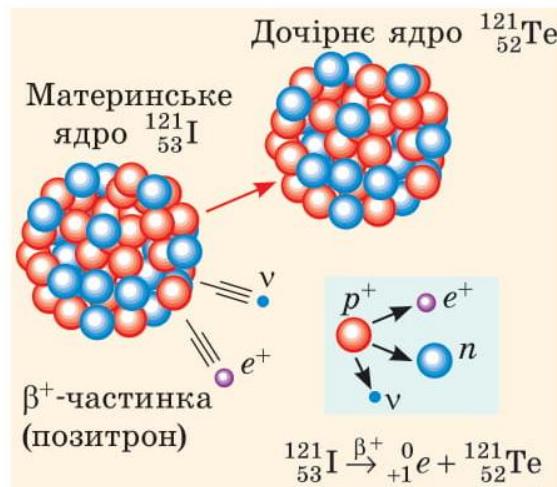


Рис. 40.4. Під час β^+ -розпаду один із протонів материнського ядра перетворюється на нейtron, позитрон й електронне нейтрин: ${}_1^1 p \rightarrow {}_0^1 n + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu$; позитрон і нейтрин випромінюються, нейtron залишається в ядрі (утворюється нове ядро)

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

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

$(t_1 = T_{1/2})$, 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.

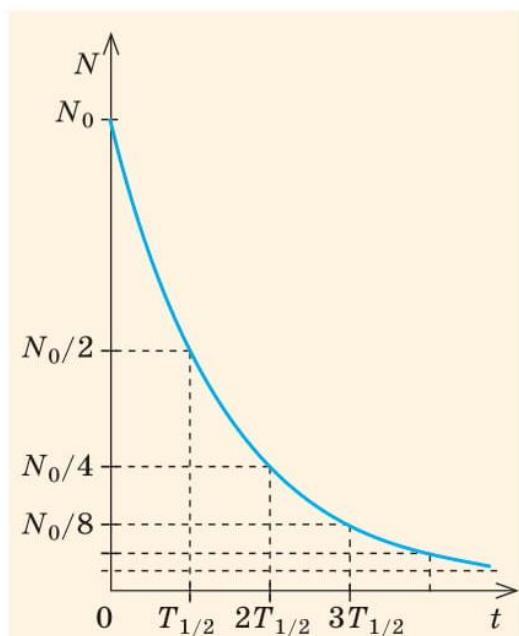


Рис. 40.5. Графік залежності кількості N ядер радіонукліда, які залишилися в зразку, від часу t .

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

Зверніть увагу!

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

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

5

Активність радіонукліда

I Радон-220, і Радон-222 є α -радіоактивними (іхні ядра можуть спонтанно розпадатися на α -частинку і відповідне дочірне 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

Учимося 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, 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:

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

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



Контрольні запитання

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



Вправа № 40

1. Під час радіоактивного розпаду з ядра $^{238}_{92}\text{U}$ випромінюється а-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.