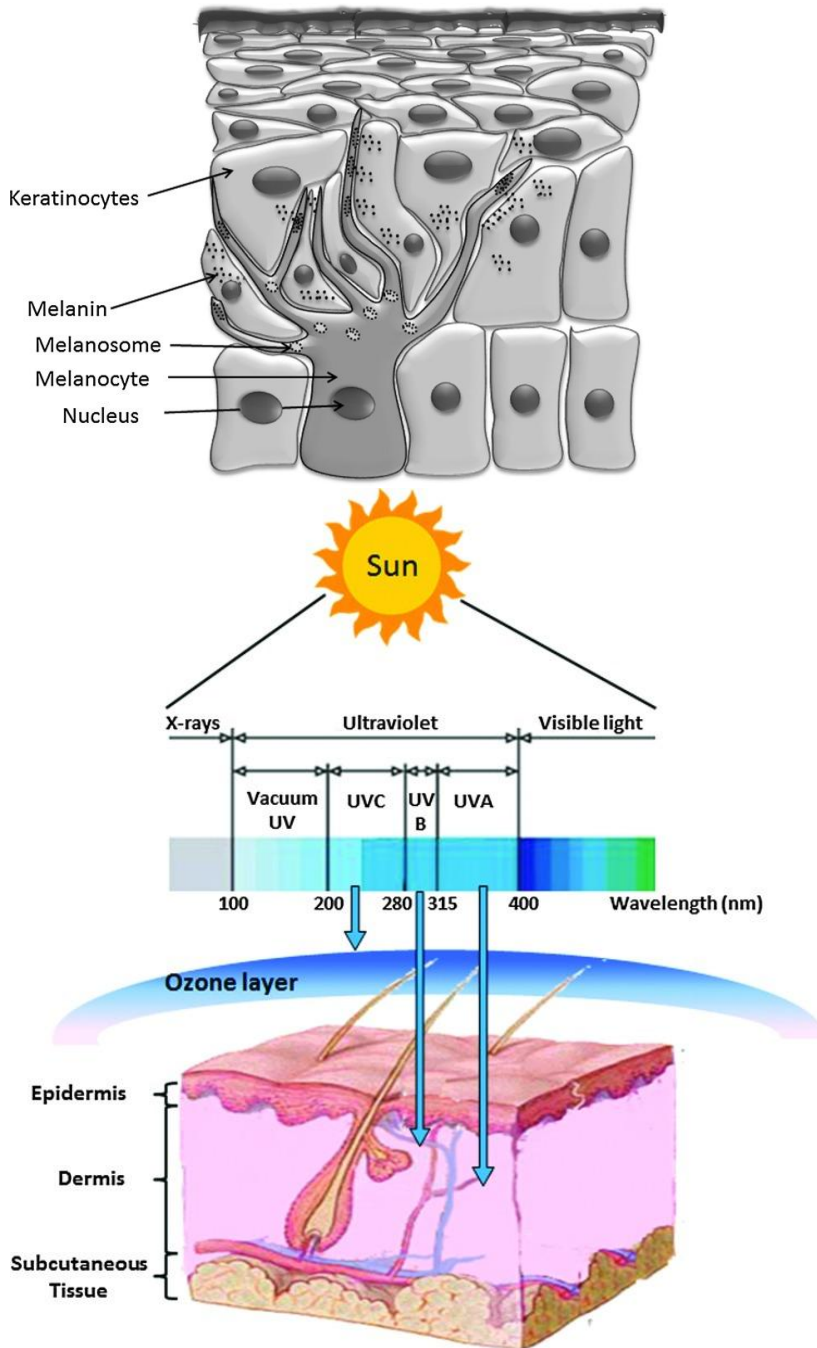


[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#01]

Взаємодія випромінювання з біологічними структурами



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#02]

**Л1:**

Іонізуючі випромінювання. Їх характеристика.

1. Випромінювання: неіонізуючі та іонізуючі.
2. Типи іонізуючих випромінювань.
3. Електромагнітне випромінювання.

4. Корпускулярне випромінювання.
5. Радіоактивні речовини як джерело іонізуючих випромінювань.
6. Проникаюча здатність іонізуючих випромінювань.
7. Загальні властивості дії іонізуючих випромінювань на біологічні об'єкти.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#03]

**Головна задача радіобіології** - розкриття загальних механізмів біологічної відповіді на дію іонізуючого випромінювання для того, щоб в кінцевому результаті мати можливість корегувати і керувати реакцією організму при опроміненні.



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#04]

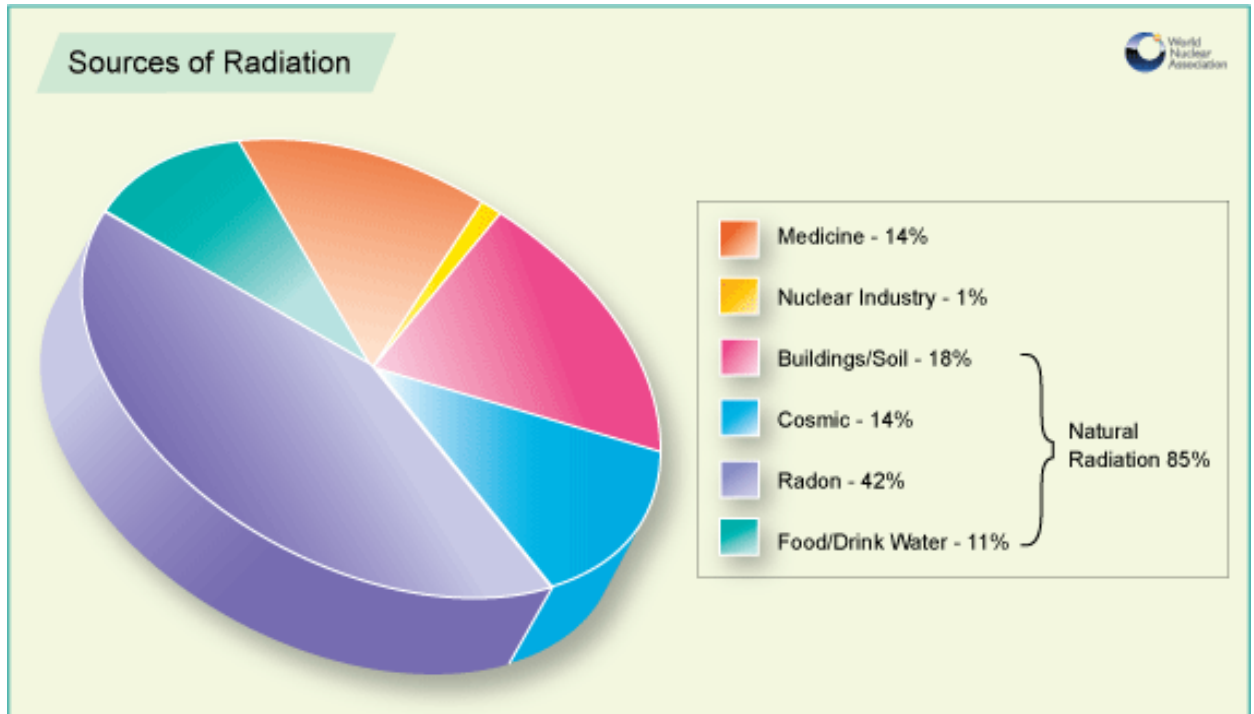
Напрямки радіобіології:

- загальна (фундаментальна) радіобіологія: цитологія, біохімія, генетика;
- радіаційна екологія;
- космічна радіобіологія;
- медична радіобіологія (імунологія, гігієна і захист, терапія пухлин)

- + новий, окремий напрямок радіобіології - радіобіологія неіонізуючих випромінювань

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#05]

Рис. Источники радиации. (Sources of Raiiation). Джерела радіації



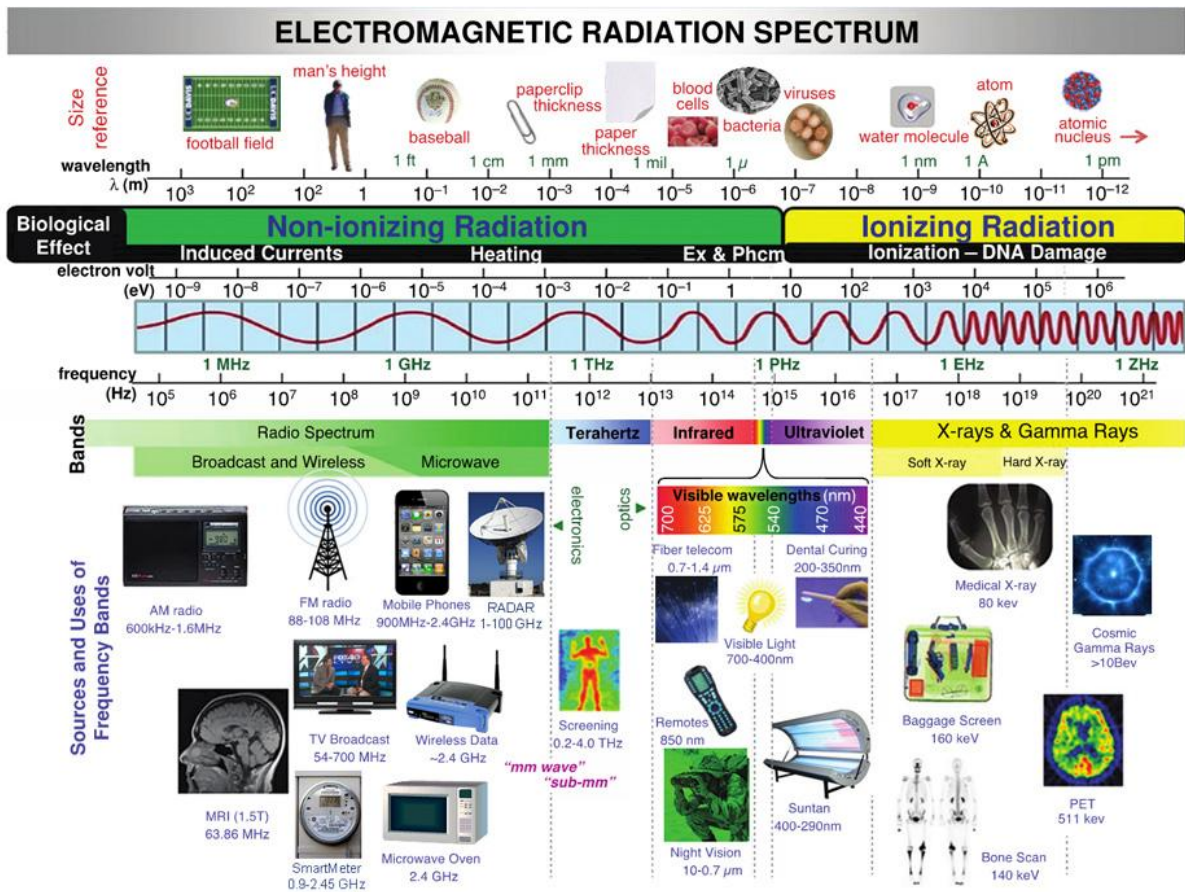
[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#06]

#### Випромінювання: неіонізуючі та іонізуючі

- **Випромінювання** – це процес вивільнення і поширення енергії у вигляді хвиль або частинок.
- **Неіонізуюче випромінювання** – випромінювання, яке має недостатньо енергії для іонізації речовини (інфрачервоне, видиме і ультрафіолетове).
- **Іонізуюче випромінювання** – це випромінювання, яке безпосередньо або опосередковано викликає іонізацію оточуючого середовища.

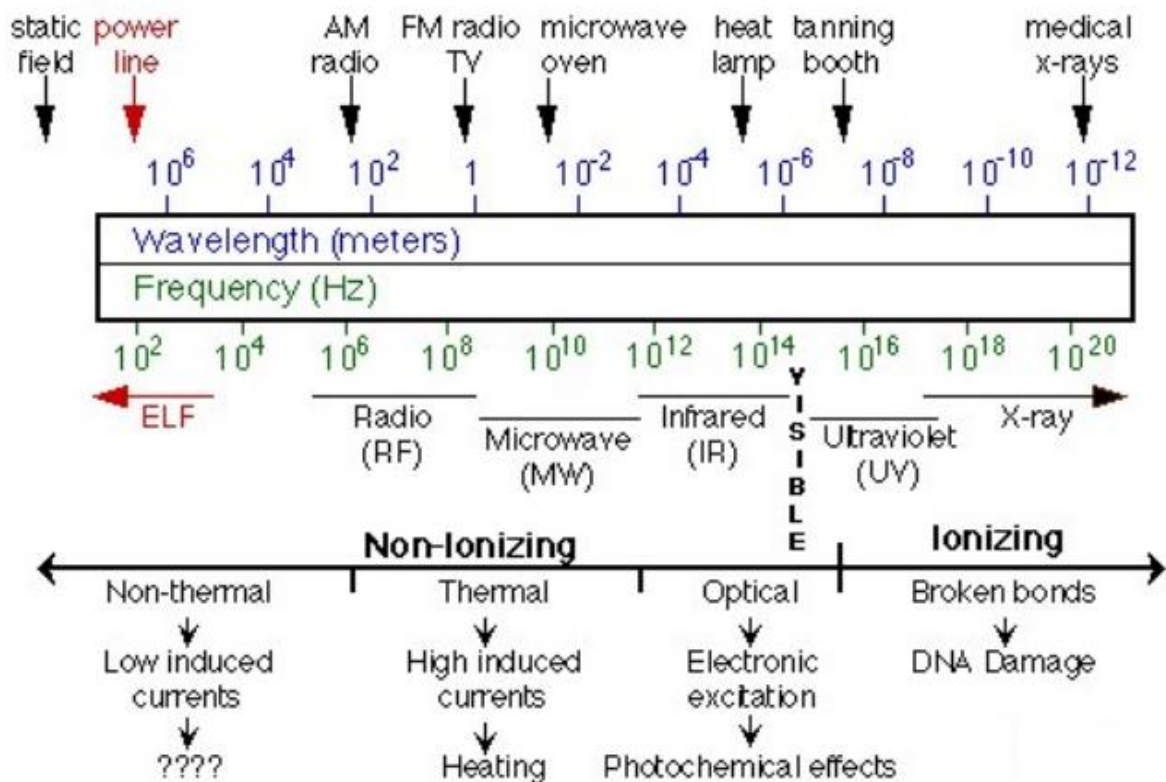
[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#07]

#### ELECTROMAGNETIC RADIATION SPECTRUM



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#08]

Електромагнітний спектр та супутні біологічні ефекти: іонізуюче та неіонізуюче випромінювання



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#09]

## 2. Типи іонізуючих випромінювань (класифікація)

### За механізмом іонізації:

**Безпосередньо іонізуюче випромінювання** — такі частинки (електрони, протони,  $\alpha$ -частинки тощо), кінетичної енергії яких достатньо, щоб викликати іонізацію атомів і молекул речовини.

**Опосередковано іонізуюче випромінювання** — незаряджені частинки (нейтрони) або квазічастинки (фотони), які при дії на речовину спричиняють появу безпосередньо іонізуючого випромінювання або викликають ядерні перетворення.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#10]

### За етапом взаємодії з речовиною:

**Первинне** — випромінювання, яке першим взаємодіє з речовиною.

**Вторинне** — виникає в результаті взаємодії первинного випромінювання з речовиною.

**Третинне** ...

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#11]

### За однорідністю енергії:

**Моноенергетичне** — представлено фотонами однакової енергії або частинками одного виду з однією й тією ж кінетичною енергією.

**Немоноенергетичне** — представлено частинками одного виду, але з різною кінетичною енергією, або фотонами з різною енергією.

**Змішане** — представлено частинками різного виду, або частинками і фотонами одночасно (наприклад, реакторне випромінювання).

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#12]

**За направленістю поширення:**

**Направлене** — випромінювання з виділеним напрямком розповсюдження.

**Дифузне** — випромінювання без переважаючого напрямку поширення.

**За природою випромінювання:**

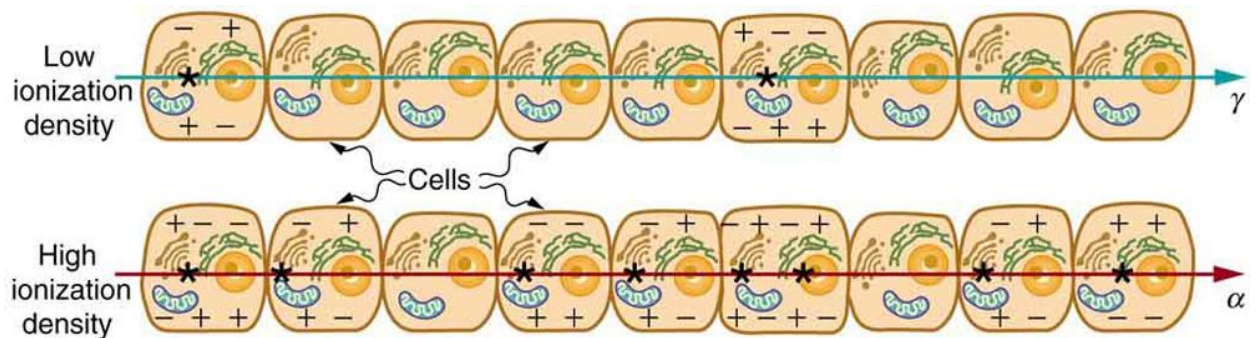
**Корпускулярне**

**Фотонне (електромагнітне)**

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#13]

Low ionization density // Низька щільність іонізації

High ionization density // Зростання щільності іонізації



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#14]

**3. Фотонне випромінювання:**

Електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль 0,0001 — 390 нм.

**γ-випромінювання** — 0,0001-0,005 нм,

**Рентгенівське** випромінювання — 0,005-1 нм,

**Ультрафіолетове** випромінювання — 1-390 нм.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#15]

**Джерела електромагнітного випромінювання:**

- ◆ **рентгенівське випромінювання** утворюється при гальмуванні швидких електронів, які отримують у вакуумі, в речовині.
- ◆ **γ-випромінювання** виникає при переході атомних ядер із одного енергетичного стану в інший, з меншою енергією. Цим процесом супроводжується α- та β-розпад, а також к- захоплення. Ці кванти генеруються також при анігіляції пари електрон-позитрон, при розпаді окремих елементарних частинок (рі-мезонів).

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#16]

γ-випромінювання

це - поперечні електромагнітні хвилі з  $\lambda < 10^{-8}$  м ( $10^{-14} \div 10^{-10}$  м) і частотою  $3 \cdot 10^{19}$ - $3 \cdot 10^{21}$  Гц, які виникають при внутрішньоядерних перетвореннях внаслідок переходу ядер з метастабільних станів у стабільні;

джерела γ-випромінювання мають лінійний спектр випромінювання, причому для різних джерел він є постійним;

енергія коливається від 0.01 ("м'які" промені) - 3 МеВ ("жорсткі" промені), іноді до 10 (зовсім окремі випадки – 100-1000) МеВ.

головний діапазон енергій для природніх нуклеотидів 0.1-2 МеВ.

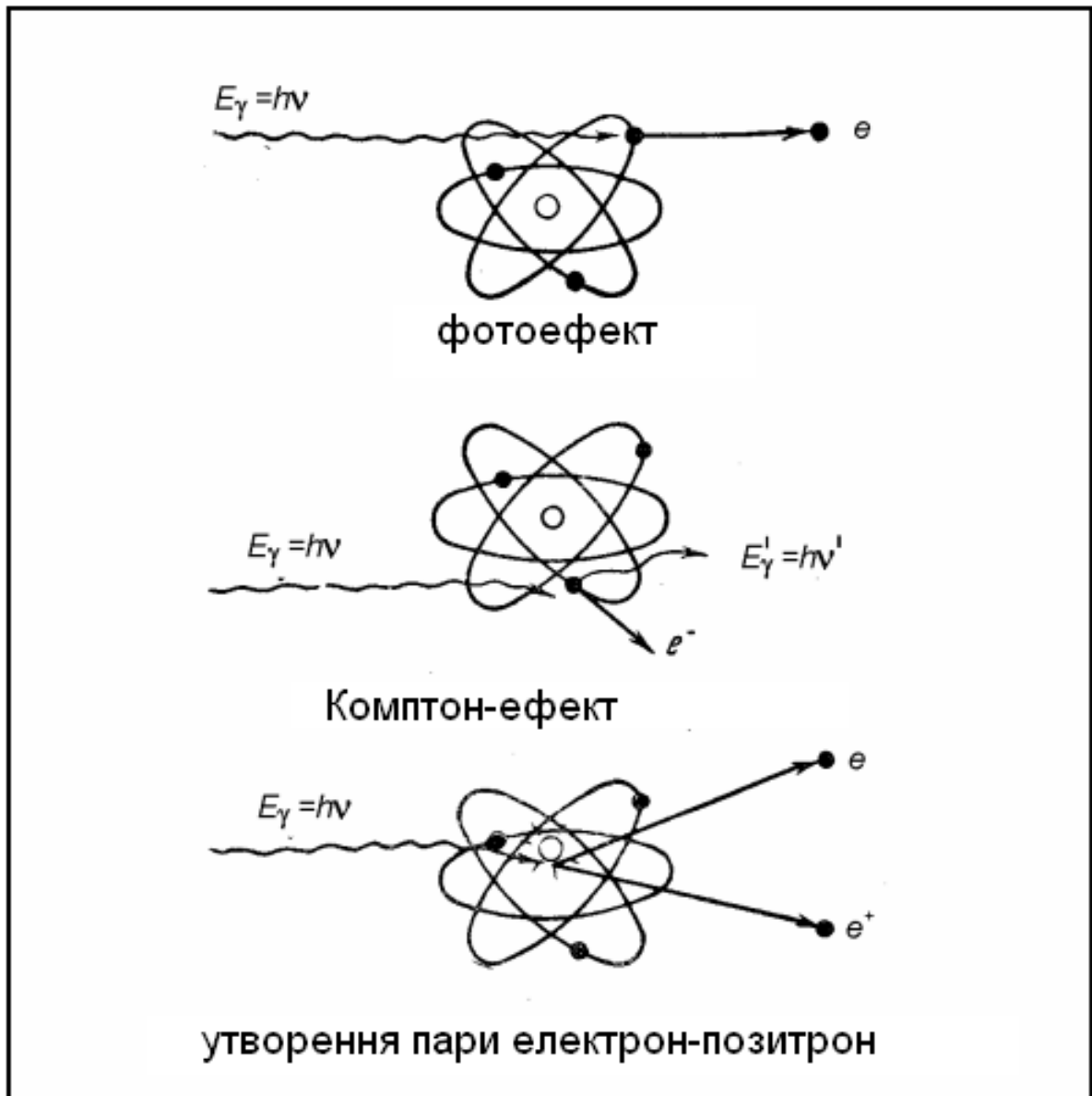
головна причина променевої хвороби при використанні атомної зброї



Антуан Анрі Беккерель, 1896 р.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#17]

Взаємодія γ-квантів з речовиною:



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#18]

Закон радіоактивного розпаду

Коли  $N$  – початкова кількість атомів, то  $dN$  – кількість атомів, які розпадаються за нескінченно малий проміжок часу  $dt$ ; в момент часу  $t$  залишатиметься  $N_t$  атомів:

$$dN = \lambda N dt,$$

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

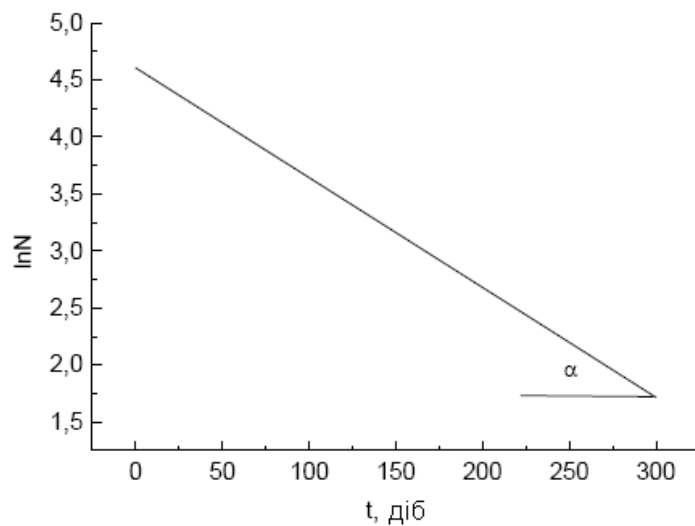
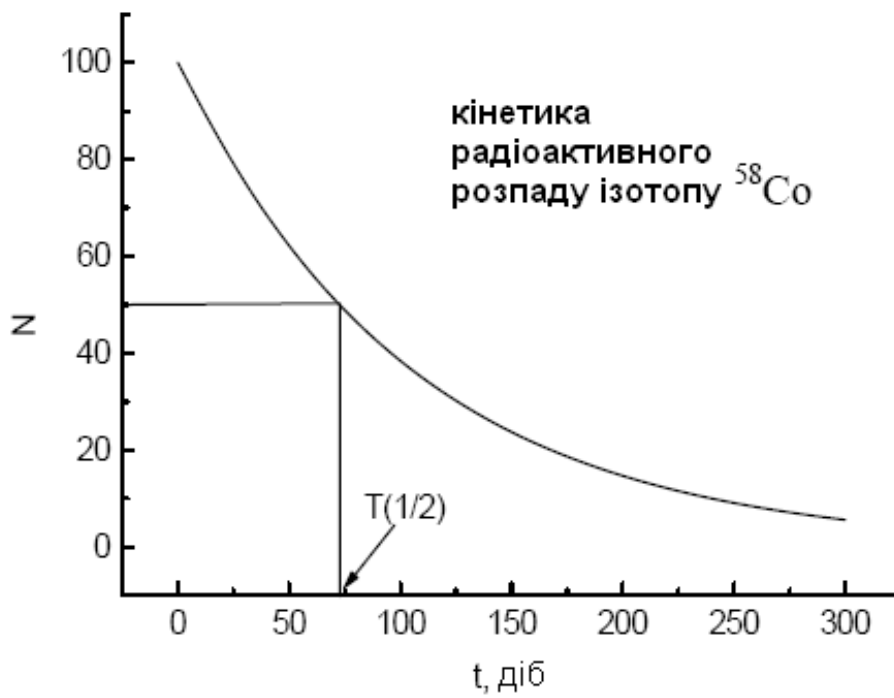
$\lambda$  - постійна розпаду ( $s^{-1}$ )



$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda$$

$T_{1/2}$  – період напіврозпаду ( $s^{-1}$ )



Періоди напіврозпаду хімічних елементів:

**Таблиця 1. Первинні радіонукліди Землі**

| <b>Радіонукліди</b> | <b>Період напіврозпаду, рік</b> | <b>Тип розпаду</b> | <b>Поширеність, %</b> |
|---------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Уран-238            | $4,5 \cdot 10^9$                | альфа              | 99,28                 |
| Уран-235            | $7,1 \cdot 10^8$                | альфа              | 0,714                 |
| Торій-232           | $1,4 \cdot 10^{10}$             | альфа              | 100,0                 |
| Калій-40            | $1,3 \cdot 10^9$                | бета, E3*          | 0,0119                |
| Ванадій-50          | $6 \cdot 10^{15}$               | бета, E3           | 0,25                  |
| Рубідій-87          | $5 \cdot 10^{10}$               | бета               | 27,19                 |
| Індій-115           | $6 \cdot 10^{14}$               | бета               | 95,67                 |
| Телур-123           | $1,2 \cdot 10^{13}$             | E3                 | 0,87                  |
| Лантан-138          | $3,2 \cdot 10^{11}$             | бета, E3           | 0,089                 |
| Церій-142           | $5 \cdot 10^{15}$               | альфа              | 11,07                 |
| Неодим-144          | $2,4 \cdot 10^{15}$             | альфа              | 23,83                 |
| Самарій-147         | $1,3 \cdot 10^{11}$             | альфа              | 15,09                 |
| Гадолій-152         | $1,1 \cdot 10^{14}$             | альфа              | 0,20                  |
| Лютецій-176         | $2 \cdot 10^{10}$               | бета               | 2,588                 |
| Гафній-174          | $2 \cdot 10^{15}$               | альфа              | 0,163                 |
| Реній-187           | $4 \cdot 10^{12}$               | бета               | 62,93                 |
| Платина-190         | $7 \cdot 10^{11}$               | альфа              | 0,012                 |

Примітка: \*E3 — електронне захоплення.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#20]

Періоди напіврозпаду та фізичні характеристики хімічних елементів:

**Таблиця 2.** Фізичні характеристики радіонуклідів, які застосовуються в медицині

| Ізотоп       | Період напіврозпаду | Максимальна енергія, МеВ |         | Повна гамма-стала<br>р.см <sup>2</sup> / год.мКі |
|--------------|---------------------|--------------------------|---------|--|
|              |                     | частинок                 | фотонів |  |
| Натрій-22    | 2,62 року           | 0,545                    | 1,274   | 11,89  |
| Натрій-24    | 15,05 год           | 1,39                     | 2,752   | 18,55  |
| Фосфор-32    | 14,2 дня            | 1,71                     | –       | –  |
| Калій-42     | 12,36 год           | 3,514                    | 1,52    | 1,36   |
| Хром-51      | 27,8 дня            | –                        | 0,32    | 0,165  |
| Кобальт-58   | 71,3 дня            | 0,474                    | 1,67    | 5,47   |
| Залізо-59    | 45,1 дня            | 1,573                    | 1,2     | 6,25   |
| Мідь-64      | 12,8 год            | 0,66                     | 1,34    | 1,12   |
| Галій-67     | 77,9 год            | –                        | 0,388   | 0,866  |
| Селен-75     | 120,4 дня           | –                        | 0,572   | 1,94   |
| Бром-82      | 35,34 год           | 0,44                     | 1,91    | 14,47  |
| Рубідій-86   | 18,7 дня            | 1,77                     | 1,08    | 0,55   |
| Стронцій-85  | 64,0 дня            | –                        | 0,514   | 2,94   |
| Стронцій-87m | 2,8 год             | –                        | 0,39    | 1,72   |
| Ітрій-90     | 64,2 год            | 2,27                     | –       | –  |
| Технецій-99m | 6,04 год            | –                        | 0,14    | 1,23   |
| Паладій-103  | 17,0 дня            | –                        | 0,498   | 0,001  |
| Йод-125      | 60,2 дня            | –                        | 0,035   | 0,002  |
| Йод-131      | 8,06 дня            | 0,81                     | 0,722   | 2,15   |
| Йод-132      | 2,26 год            | 2,15                     | 2,39    | 11,55  |
| Ксенон-133   | 5,65 дня            | 0,346                    | 0,16    | 0,145  |
| Ітербій-169  | 31,8 дня            | –                        | 0,308   | –  |
| Золото-198   | 2,7 дня             | 0,96                     | 0,412   | 2,3  |
| Ртуть-197    | 65,0 год            | –                        | 0,19    | 0,109  |
| Ртуть-203    | 47,0 дня            | 0,21                     | 0,279   | 1,25   |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#21]

Послаблення потоку γ-випромінювання:

При проходженні γ-випромінювання через речовину відбувається його поглинання і розсіювання за законом:

$$n = n_0 e^{-\mu d}$$

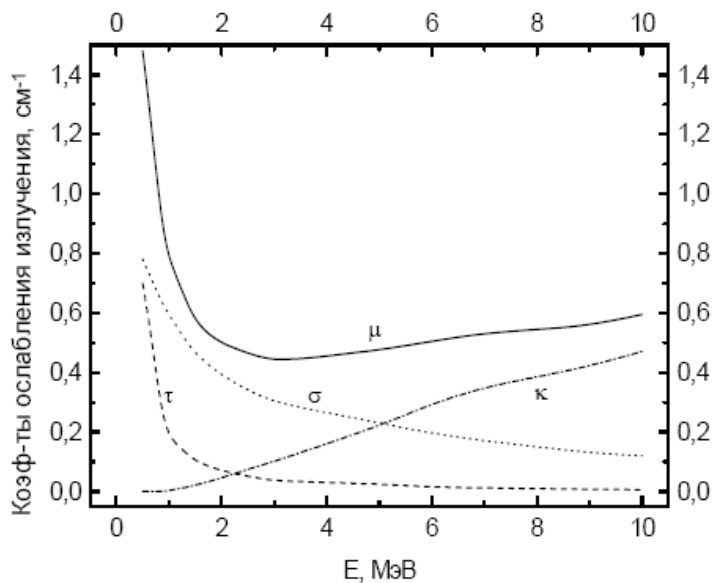
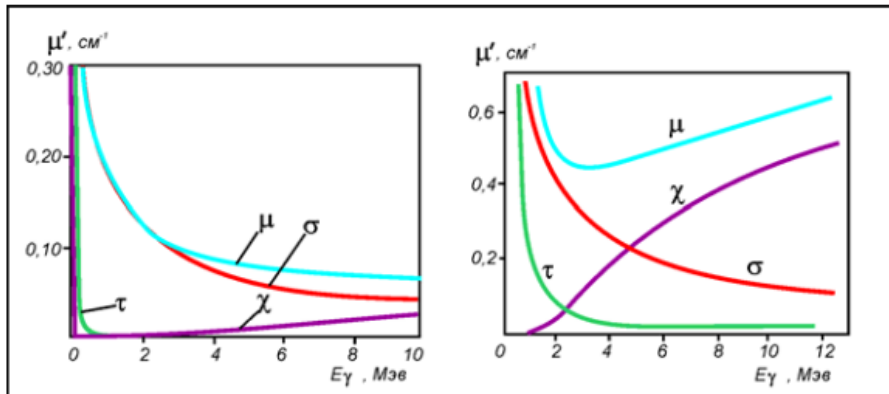
де:

$n_0$  – початковий потік,

$n$  – потік після проходження через поглинаючу речовину товщиною  $d$ ,

$\mu$  – лінійний коефіцієнт послаблення ( $\text{см}^{-1}$ ), який складається з коефіцієнтів поглинання  $\gamma$ -випромінювання при фотоефекті ( $\tau$ ), Комптон-ефекті ( $\sigma$ ) і ефекті утворення пар ( $\kappa$ ):

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$



Энергетическая зависимость линейных коэффициентов ослабления  $\gamma$ -излучения для свинца.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#22]

Лінійний коефіцієнт послаблення (продовження):

коефіцієнт послаблення має ряд закономірностей:

- лінійний коефіцієнт фотопоглинання ( $\tau$ ):

$$\tau = \tau_e + \tau_s$$

$\tau_e$  – характеризує частину коефіцієнта поглинання, яка призводить до перетворення первинної енергії фотона в кінетичну енергію електрона,

$\tau_s$  – характеризує перетворення енергії первинних фотонів у енергію характеристичного випромінювання

- лінійний коефіцієнт фотопоглинання ( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}}$$

$$E_\gamma = 0.5 \div 3 \text{ MeV} \leftrightarrow \tau_{\text{max}}$$

$$E_\gamma > 10 \text{ MeV} \leftrightarrow \tau \approx 0$$

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#23]

- лінійний коефіцієнт комптонівського розсіювання ( $\sigma$ ):

$$\tau = \sigma_e + \sigma_s$$

$\sigma_e$  – характеризує частину коефіцієнта поглинання, яка призводить до перетворення первинної енергії фотона в кінетичну енергію електрона,

$\sigma_s$  – характеризує перетворення енергії первинних фотонів у енергію характеристичного випромінювання

- лінійний коефіцієнт комптонівського розсіювання ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \frac{Z}{E_\gamma}$$

$$E_\gamma > 1 \text{ MeV} \leftrightarrow \sigma > \tau$$

$$E_\gamma > 10 \text{ MeV} \leftrightarrow \sigma \approx 0$$

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#24]

- лінійний коефіцієнт ефекту утворення електрон-позитронних пар ( $\kappa$ ):

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_s$$

$\kappa_e$  – характеризує частину коефіцієнта поглинання, яка призводить до перетворення первинної енергії фотона в кінетичну енергію електрона і позитрона,

$\kappa_s$  – характеризує перетворення енергії первинних фотонів у енергію анігіляційного випромінювання

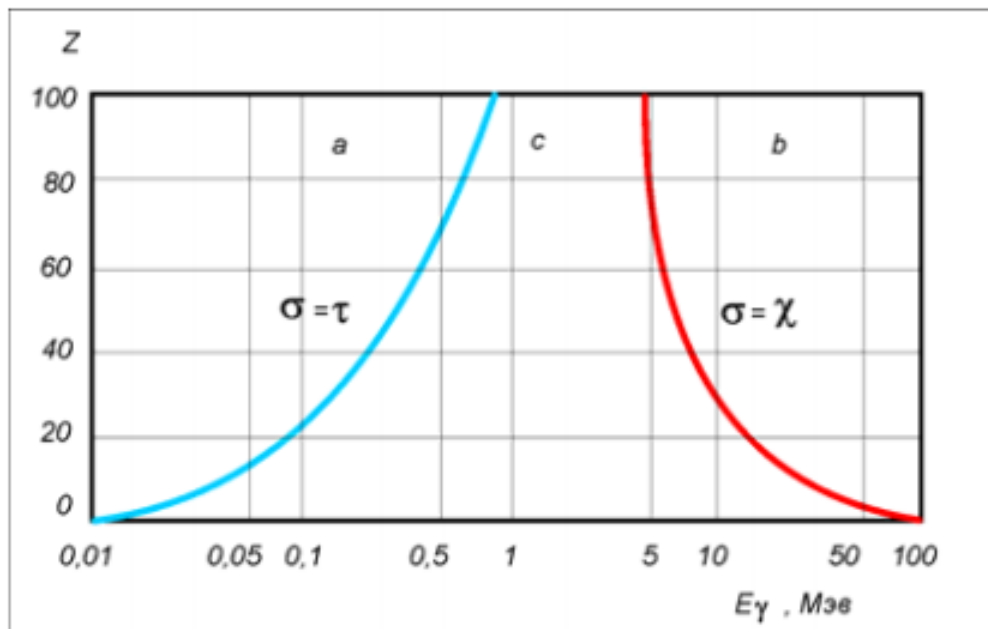
- лінійний коефіцієнт комптонівського розсіювання ( $\sigma$ ):

$$\kappa = Z^2 \ln E_\gamma$$

$$E_\gamma > 10 \text{ MeV} \leftrightarrow \kappa \gg \sigma \tau$$

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#25]





Ефекти поглинання фотонів залежать, по-перше, від енергії  $\gamma$ -квантів, і, по-друге, від заряду ядер речовини

(та, по-третє, від густини речовини)



$$\mu = \mu_e + \mu_s$$

Енергія первинного фотона перетворюється на кінетичну енергію електронів і позитронів, а також на енергію вторинного фотонного випромінювання

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#26]

Масовий коефіцієнт послаблення ( $\mu_m$ ) та закон послаблення:

$$\mu_m = \mu / \rho$$

Речовини з однаковими (подібними) ефективними порядковими номерами мають однакові (подібні)  $\mu_m$ .

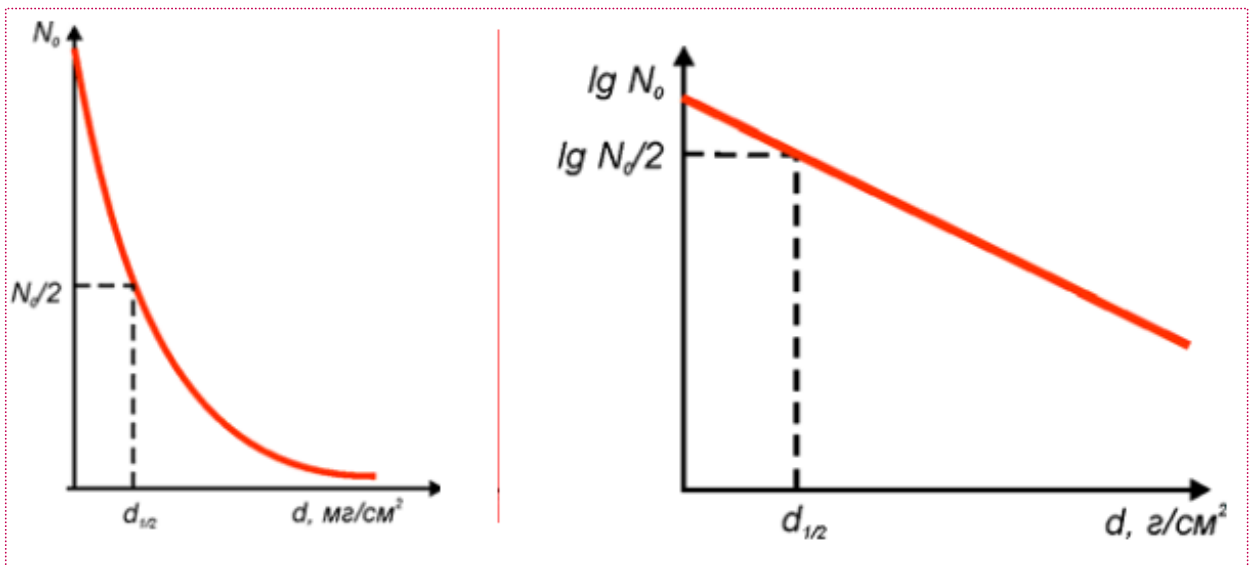
Відповідно, можна переписати **закон послаблення**:

$$n = n_0 e^{-\mu_m \mu_d}$$

де

$$\mu_d = \rho d$$

- маса (г), яка відповідає  $1 \text{ cm}^2$  мішені з товщиною  $d$ .



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#27]

Деякі показники:



Толщина слоя половинного поглощения гамма-излучения разными материалами

| Энергия гамма-квантов, МэВ | Толщина слоя вещества, ослабляющего поток $\gamma$ – излучения в 10, см |       |        |
|----------------------------|---|-------|--------|
|                            | Вода  | Бетон | Свинец |
| 0,5                        | 24  | 12    | 1,3    |
| 5,0                        | 76  | 36    | 4,7    |

Линейные коэффициенты передачи  $\mu_k$  и линейные коэффициенты ослабления  $\mu$ , в различных средах,  $\text{см}^{-1}$

| Энергия $\gamma$ -квантов МэВ | Вода    |        | Алюминий |       | Свинец  |       |
|-------------------------------|---------|--------|----------|-------|---------|-------|
|                               | $\mu_k$ | $\mu$  | $\mu_k$  | $\mu$ | $\mu_k$ | $\mu$ |
| 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  |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#28]

рентгенівське випромінювання (РВ)

РВ – випромінювання, яке розташовується в спектральній області між  $\gamma$ -та УФ-випромінюванням, з  $\lambda = 0.005 (0.001) - 1 (100)$  нм:

\* до 0.2 нм - "м'яке" випромінювання,

\* понад 0.2 нм - "жорстке" випромінювання

Енергетичний діапазон 0.1 KeV - 0.1 MeV

РВ (залежно від механізму їх виникнення) можуть мати неперервний (гальмівне випромінювання) або лінійчастий (характеристичне випромінювання) спектр



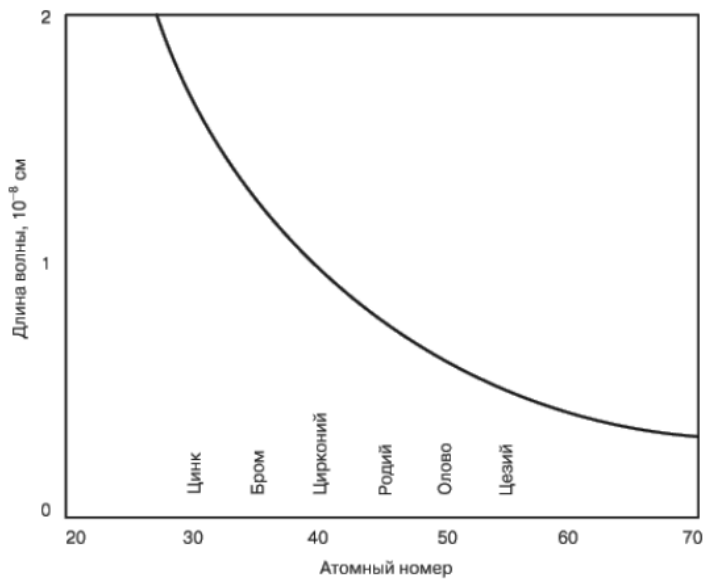
Іван Пуллой, 1895 р.



Вильгельм Конрад Рентген, 1895 р.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#29]

Характеристичне рентгенівське випромінювання

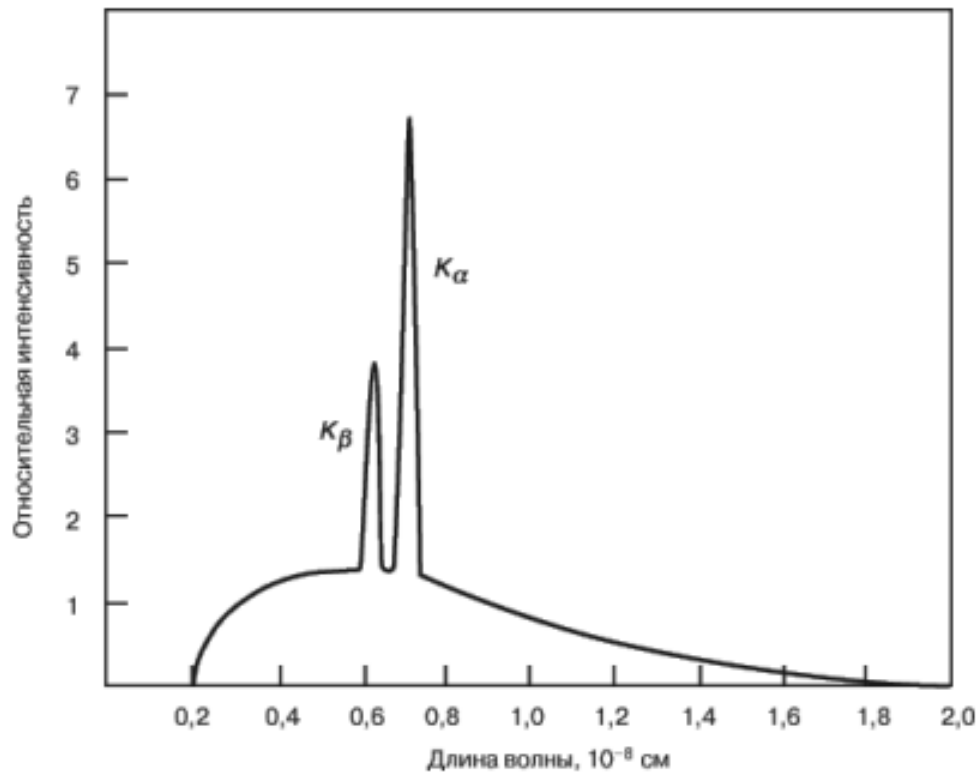


- **Характеристичне РВ** – електромагнітне випромінювання, яке випромінюється при переходах електронів із зовнішніх електронних оболонок атомів на внутрішні (характеристичний спектр)
- **Характеристичний спектр** – лінійчатий рентгенівський спектр, який виникає при переходах електронів верхніх оболонок атома на більш низько розміщені до ядра K-, L-, M-, N-оболонки.
- Частоти ліній характеристичного спектра хімічних елементів відповідають **закону Мозлі**:
- де  $\nu$  – частота лінії спектра,  $A, B$  – постійні для кожної лінії спектра,  $Z$  – атомний номер

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#30]

Гальмівне рентгенівське випромінювання

Характеристичні лінії



Виникає при гальмуванні  $e^{-}$  при їх стиканні з частинками речовини.

Наприклад, отримання гальмівного РВ у рентгенівській трубці – через бомбардування металевого електрода в вакуумній трубці пучком прискорених  $e^{-}$  (коли прискорені  $e^{-}$  мають надто значну енергію, РВ переходить в енергетичний спектр  $\gamma$ -випромінювання)

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#31]

#### 4. Корпускулярне випромінювання:

- До нього належать:
- $\alpha$ -випромінювання,
- електронне випромінювання,
- протонне випромінювання,
- нейтронне випромінювання,
- мезонне випромінювання.

- У випадку, коли частинки мають заряд, вони є безпосередньо іонізуючими, незаряджені – опосередковано іонізуючі
- залежно від маси, заряду і швидкості частинок КВ поділяють на:
- **легкі і жорсткі** (діапазон  $E_{\max}$  0.015-0.05 МеВ ("легке") - 3-12 МеВ ("жорстке").

$$E = mv^2/2$$

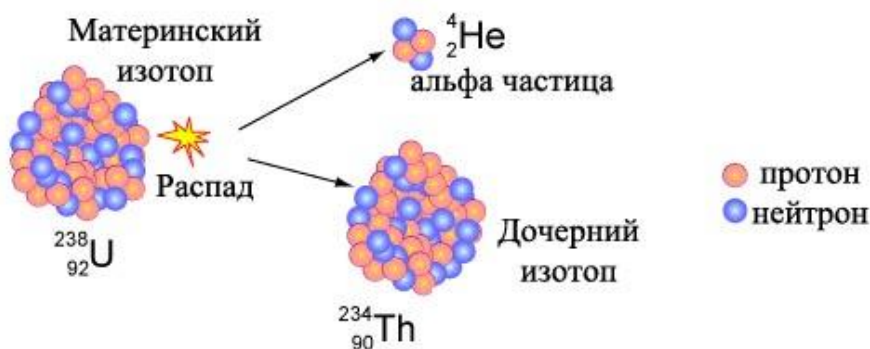
- **заряджені і незаряджені,**
- **повільні і швидкі.**

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#32]

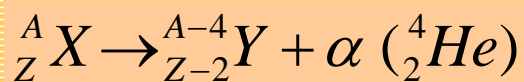
$\alpha$ -частинки:

- **$\alpha$ -частинки** – потік ядер атомів гелію (складаються з 2 протонів і 2 нейтронів), який випромінюється при  $\alpha$ -розпаді окремих радіоактивних атомів.
- заряд +2.
- маса 4.003 а.о.м.
- енергія 2 (4) –11 (9) МеВ (для кожного ізотопу є постійною).
- $\alpha$ -розпад характерний для елементів з Z понад 82 та A понад 200.

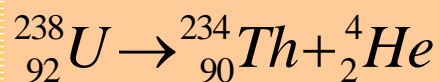
### Альфа распад урана 238



- **$\alpha$ -розпад** – тип розпаду ядра, при якому відбувається випромінювання  $\alpha$ -частинки:



приклад :



- При  $\alpha$ -розпаді масове число ядра (A) зменшується на 4, а атомний номер (Z) – на 2.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#33]

$\alpha$ -частинки:

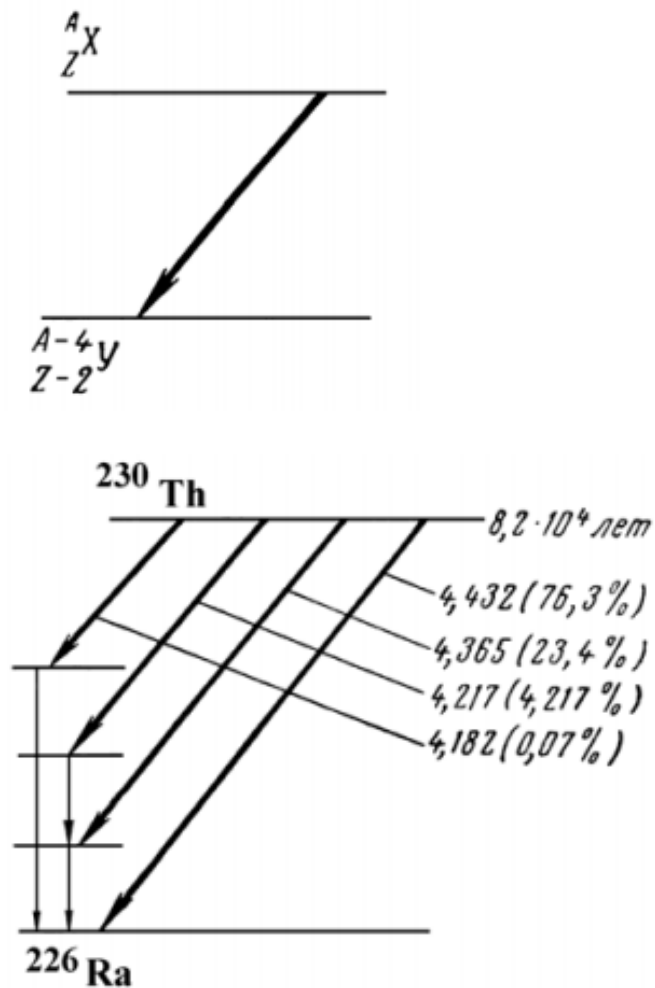
- **$\alpha$ -розпад** є можливим, оскільки маса (а значить і сумарна енергія)  $\alpha$ -радіоактивного ядра більша від суми мас  $\alpha$ -частинки і дочірнього ядра. Надлишок енергії вивільняється в формі кінетичної енергії  $\alpha$ -частинки і віддачі дочірнього ядра
- Відповідно,  $V=15\ 000\text{--}20\ 000$  км/с
- **Пробіг**  $\alpha$ -частинки в

повітрі – 5-8 см,

воді – 30-50 мкм,

металі – 10-20 мкм

Таким чином,  $\alpha$ -частинки мають малу проникаючу здатність



[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#34]

$\alpha$ -частинки:

- Довжина пробігу /  $\alpha$ -частинки (закон Гейгера):

$$l = kV_0^3$$

де  $V_0$  – початкова швидкість частинки,  $k$  – константа,  $k=9,25 \cdot 10^{-28}$  сек<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>.

- Емпіричне **правило Брега-Клімента:**

$$l = 0.003 * l_0 A^{1/2} / \rho$$

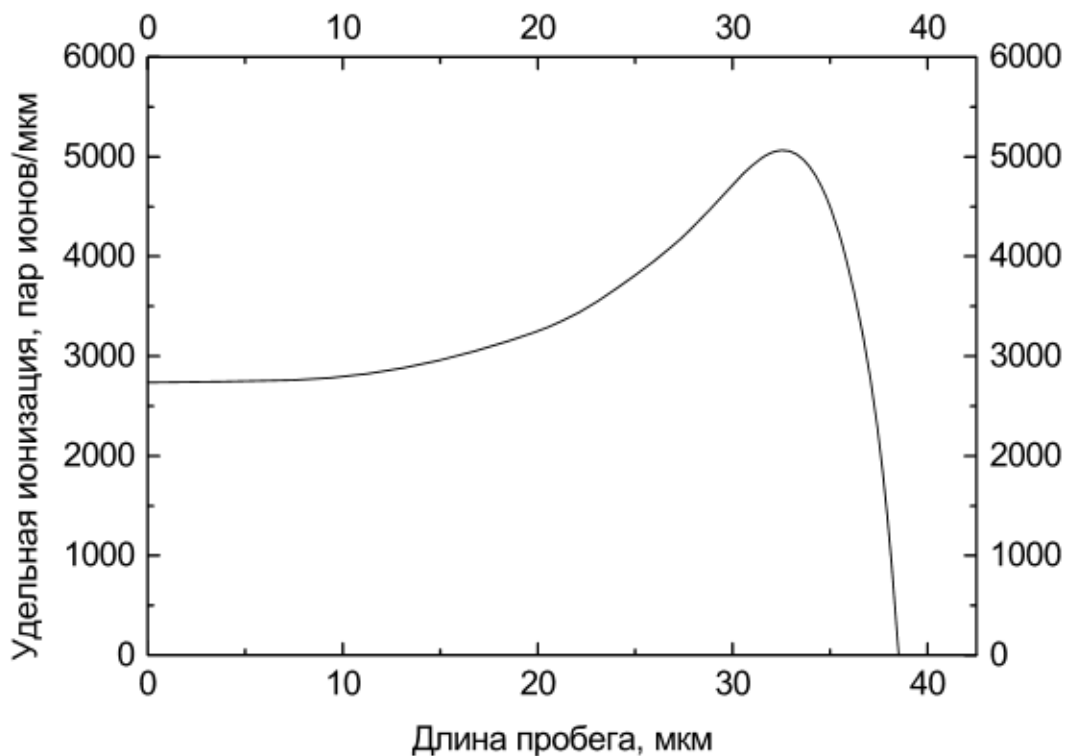
де  $l_0$  – довжина пробігу в повітрі,  $\rho$  – густина речовини,  $A$  – атомний номер елемента, який утворює речовину.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#35]

$\alpha$ -частинки:

На 1 акт іонізації витрачається близько 35 еВ.

Пробіг 1 см в повітрі забезпечує створення до 50 000 пар іонів.



глибина проникання  $\alpha$ -частинки в речовину (-> там де ближче до 40)

*Залежність питомої іонізації від пробігу  $\alpha$ -частинки*

**(крива Брегга)**

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#36]

$\alpha$ -частинки:

- Енергія, яка вивільняється при  **$\alpha$ -розпаді**, визначається як:

$$E = [M_A - M_{A-4} - M_\alpha]c^2$$

де  $M_A$  – маса материнського ядра,  $M_{A-4}$  – маса дочірнього ядра,  $M_\alpha$  – маса  $\alpha$ -частинки.

- Енергія  **$\alpha$ -частинки**:

$$E_\alpha = E \frac{M_{A-4}}{M_A}$$

- **Умова  $\alpha$ -розпаду**:

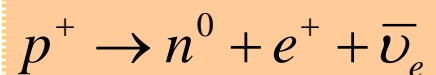
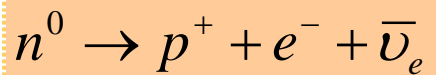
$$M_A > M_{A-4} + M_\alpha$$

- Загалом, до  $\alpha$ -розпаду здатні ядра з  $Z > 82$ .

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#37]

$\beta$ -випромінювання:

- Це – корпускулярне випромінювання з неперервним енергетичним спектром, яке складається з негативно або позитивно заряджених частинок (електронів або позитронів) і яке виникає при радіоактивному  $\beta$ -розпаду ядер.
- **$\beta$ -розпад** – самовільне перетворення ядер, яке супроводжується випромінюванням (або поглинанням) електрона і антинейтрино або позитрона і нейтрино. При цьому:



- Відомо **три типи  $\beta$ -розпаду**: електронний розпад (перетворення нейтрона в протон), позитронний розпад (перетворення протона в нейтрон) і електронне захоплення.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#38]

$\beta$ -випромінювання:

- Проникаюча здатність:

1  $e^-$  з енергією 1 MeV при пробігу 1 см створює приблизно 90 пар іонів (на створення 1 пари іонів витрачається у середньому 32,5 eV).

- Закон послаблення потоку  $\beta$ -частинок:

$$n = n_0 e^{-\mu d}$$

де:

$n_0$  – початковий потік,  $n$  – потік після проходження через поглинаючу речовину товщиною  $d$ ,  $\mu$  – лінійний коефіцієнт послаблення ( $\text{см}^{-1}$ )

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#39]

незаряджені іонізуючі частинки (нейтрони) :

- Теплові нейтрони - мають енергію теплового руху (при  $T_{\text{кімн}}=0.25$  eV)
- Повільні нейтрони - енергія  $<1$  KeV
- Проміжні нейтрони - енергія 1-100 KeV
- Швидкі нейтрони - енергія  $>100$  KeV
- Надшвидкі нейтрони - енергія 10-50 MeV

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#40]

Радіоактивність, активність та одиниці вимірювання:

**Радіоактивність** – це самовільне перетворення ядер елементів, при якому ядра перетворюються у більш стабільні; цей процес супроводжується утворенням корпускулярного або хвильового випромінювань.

**Активність речовини** – це кількість актів його розпаду за 1 секунду.

**Одиниці активності:**

- системна - **Бекерель** (Bq, Bk): 1 Bk - активність нукліду, в радіоактивному джерелі при якому відбувається 1 розпад за 1 секунду
- позасистемна (традиційна) - **Кюрі** (Ки, Ci); 1 Ci - така кількість радіоактивної речовини, яка розпадається з активністю  $3.7 \cdot 10^{10}$  розпадів/с.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#41]

Дози (експозиційна доза):

- **Експозиційна доза** – характеристика поля випромінювання:

**1 Кл/кг** – у 1 кг сухого атмосферного повітря іонізуюче випромінювання індукує іони, які несуть електричний заряд кожного знаку в 1 Кл

- **1 А/кг** = 1 Кл/с\*кг – потужність експозиційної дози.



- **1 Р (рентген)** – доза (зазвичай, характеризує рентгенівське та  $\gamma$ -випромінювання), при якій в  $\text{см}^3$  сухого атмосферного повітря при температурі  $0^\circ\text{C}$  і тиску 760 мм рт.ст. (101,3 кПа) утворюються іони з зарядом  $0.333 \cdot 10^9$  Кл ( $2.082 \cdot 10^9$  пар іонів).
- $1 \text{ Р} = 3876 \text{ Кл/кг}$
- **1 фер (фізичний еквівалент рентгена)** – експозиційна доза будь-якого іонізуючого випромінювання – аналог 1 Р

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#42]

Дози (поглинута доза):

- **Поглинута доза** – характеристика об'єкту, який піддається опромінюванню:
- **1 Гр (грей)** = 1 Дж/кг
- **1 Гр/с** = 1 Дж/с\*кг – потужність поглинутої дози.
- **1 рад** = 0,01 Дж/кг = 0,01 Гр
- **1 рад/с** – потужність поглинутої дози

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#43]

Дози (еквівалентна доза):

- **1 зіверт (Зв, Sv)** – кількість енергії, яка поглинається 1 кг біологічної тканини, та яка відповідає дії поглиненої доз 1 Гр.
- **1 бер – біологічний еквівалент рентгена** – така поглинута доза певного виду випромінювання, що спричиняє біологічний ефект, еквівалентний дії 1 Р:
- $D_{\text{екв}} = D_{\text{погл}} \cdot k$

**k:**

- Рентгенівське,  $\gamma$ -,  $\beta$ -випромінювання = 100 бер/Гр (1 бер/рад)
- Повільні нейтрони = 300 бер/Гр (3 бер/рад)
- $\alpha$ -випромінювання, швидкі нейтрони, швидкі протони = 1000 бер/Гр (10 бер/рад)
- Продукти поділу ядер = 2000 бер/Гр (20 бер/рад)

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#44]

5. Радіоактивні речовини як джерело іонізуючих випромінювань

**Джерела радіоактивного випромінювання** – це об'єкти, які містять радіоактивний матеріал (**радіонуклідні джерела [Закриті, Відкриті]**), або технічні пристрої, які здатні при певних умовах випромінювати іонізуюче випромінювання

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#45]

Джерела  $\gamma$ -випромінювань

### Характеристики изотопных $\gamma$ -препаратов.

| Радиоактивный элемент               | Активность, Г-ЭКВ (МГ-ЭКВ) Ra | Размеры, мм |             | Оболочка   |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|--|
|                                     |                               | диаметр     | высота      |  |
| $^{170}\text{Tl}$                   | 0.002, 0.004                  | 4.5         | 5           | алюминий   |
|                                     | 0.02, 0.1                     | 7.5         | 8           |  |
|                                     | 0.5                           | 12          | 10          |  |
| $^{75}\text{Se}$                    | 0.05, 0.1                     | 7.5         | 9.5         | алюминий   |
|                                     | 0.02, 0.1                     | 12.5        | 12.5        |  |
|                                     | 0.5                           | 16.5        | 16.5        |  |
| $^{192}\text{Ir}$                   | 0.01, 0.1                     | 4.5         | 5           | алюминий   |
|                                     | 0.5, 2.5                      | 4.5         | 5           |  |
|                                     | 20                            | 7.5         | 8           |  |
| $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$ | 0.0001, 0.0005                | 6           | 9           | нержавеющая сталь                                      |
|                                     | 0.001, 0.005,                 | 6           | 9           |  |
|                                     | 0.01                          | 6           | 9           |  |
|                                     | 0.05, 0.1, 0.5                | 7.5         | 14          |  |
|                                     | 2<br>10, 20                   | 16.5        | 18.1        |  |
| $^{134}\text{Cs}$                   | 0.01, 0.5                     | 7.5         | 8           | алюминий   |
|                                     | 2                             | 12          | 10          |  |
| $^{152}\text{Eu}$                   | 0.5, 1, 2                     | 7.5         | 8           | алюминий   |
| $^{155}\text{Eu}$                   | 0.0001, 0.0005                | 7           | 27          | алюминий   |
|                                     | 0.001, 0.005                  |             |             |  |
|                                     | 0.01                          |             |             |  |
| $^{60}\text{Co}$                    | (0.1, 0.25, 2.5)              | 0.7         | 2           | без оболочек<br>нержавеющая<br>сталь<br>– " –<br>– " – |
|                                     | (0.5, 1, 2)                   | 0.7         | 5, 10, 20   |  |
|                                     | (3.5)                         | 0.9         | 30, 50      |  |
|                                     | (2, 5, 10)                    | 0.9         | 10          |  |
|                                     | 10, 30, 50                    | 0.9         | 20, 60, 100 |  |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#46]

Джерела  $\beta$ -випромінювань

### Изотопные источники β-излучения.

| Радиоактивный изотоп                | Активность, мКи | Диаметр активной части, мм |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| $^{147}\text{Pm}$                   | 1 – 50          | 10 -50                     |
| $^{204}\text{Tl}$                   | 100 – 1000      | 50                         |
|                                     | 5 – 25          | 10                         |
|                                     | 20, 40, 1000    | 20                         |
| $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$    | 0.02 – 2000     | 10 – 50                    |
| $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$ | 1 – 100         | 10 – 50                    |
| $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$ | 1 – 100         | 10 - 50                    |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#47]

Реакторне випромінювання

### Условия облучения в атомных реакторах.

| Параметры облучения   | в активной зоне     | вне активной зоны |
|---|---------------------|-------------------|
| Плотность потока тепловых нейтронов, $\text{п/см}^2 \cdot \text{с}$ | $10^{12} - 10^{14}$ | $10^7 - 10^{10}$  |
| Плотность потока быстрых нейтронов, $\text{п/см}^2 \cdot \text{с}$  | $2.5 \cdot 10^{14}$ | -                 |
| Мощность экспозиционной дозы $\gamma$ -излучения, $\text{Р/с}$      | до $10^8$           | $10^2$            |
| Температура, $^{\circ}\text{C}$                                     | 250 - 500           | 100               |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#48]

6. Проникаюча здатність іонізуючого випромінювання

- **Проникаюча здатність** - це шлях, який хвиля або частинка здатна проходити в речовині.
- **Проникаюча здатність** знаходиться в зворотній залежності від маси випромінювання та від відстані пробігу:
- $I(l) = I(0) \cdot e^{-k \cdot l}$ , де  $k$  - лінійний коефіцієнт послаблення (поглинання) матеріалу та  $l$  - товщина матеріалу.

- У випадку електромагнітного випромінювання повного поглинання досягти проблематично, використовують показник *лінійного коефіцієнта послаблення* - відносне зниження енергії випромінювання після проходженні 1см речовини.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#49]

напівослаблення квантів з початковою енергією 2.5 MeV:

| матеріал | Товщина |
|----------|---------|
| повітря  | 200 м   |
| дерево   | 25 см   |
| бетон    | 10 см   |
| свинець  | 1.8 мм  |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#50]

Проникаюча здатність корпускулярного випромінювання

- ◆ відносно велика проникаюча здатність у незаряджених частинок (нейтронів), а для заряджених частинок вона визначається масою, енергією та швидкістю руху частинки:
- ◆  $\beta$ -частинки мають малу масу та велику швидкість - тому вони слабо втрачають енергію на іонізацію речовини і здатні проходити досить великі відстані. Траєкторія руху  $\beta$ -частинок звивиста внаслідок зміни електричними полями зустрічних атомів.

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#51]

7. Загальні властивості дії іонізуючих випромінювань на біологічні об'єкти

Особливості, які варто враховувати при аналізі радіобіологічних процесів

**Закон Гротгуса** (загальний закон фотохімії): хімічну реакцію в речовині може викликати тільки поглинута частина світла.

**Радіобіологічний парадокс:** поглинання дуже незначної кількості енергії призводить до значної реакції організму, аж до його загибелі.

**Спадкова дія іонізуючих випромінювань.**

**Кумуляція доз:** накопичення ефектів.

**Наявність латентного періоду** (декілька хвилин – десятки років): характерна для опромінення досить невеликими дозами тривалий час .

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#52]

- **Радіочутливість** - головний критерій ефективності дії випромінювання - чутливість біологічних об'єктів до впливу випромінювання.

- **LD50** - доза випромінювання, яка спричиняє загибель половини досліджуваних об'єктів - показник, який найчастіше використовують для кількісної характеристики радіочутливості.
- **Радіорезистентність** - поняття протилежне до радіочутливості.

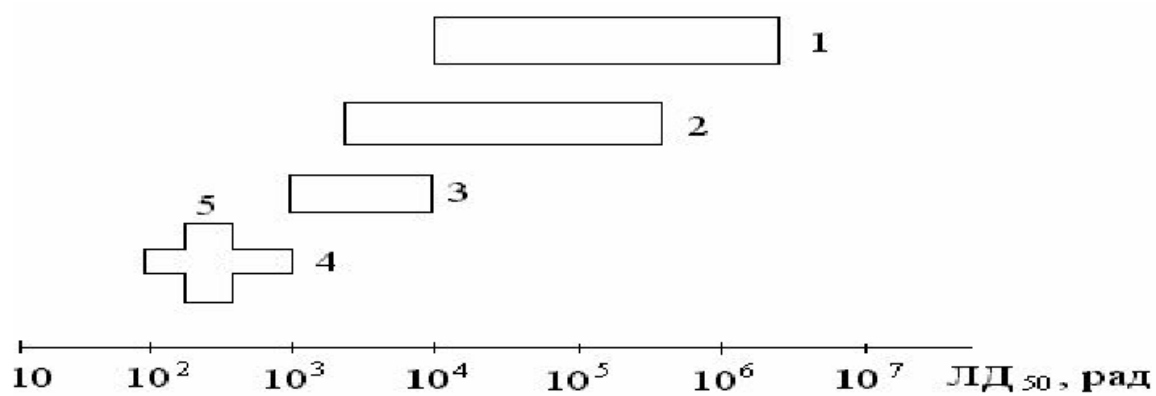
[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#53]

Радіочутливість

| Тип                   | ЛД <sub>50</sub> , Гр | Средня величина ЛД <sub>50</sub> |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| <u>Простейшие</u>     |                       |                                  |
| Бактериофаги          | 220 – 8400            | 3300                             |
| Вирусы                | 62 – 4600             |                                  |
| Бактерии              | 17 – 3500             |                                  |
| <u>Растения</u>       |                       |                                  |
| Водоросли             | 300 – 1700            | 7500                             |
| Лишайники             | 5000 – 10000          |                                  |
| Покрытосеменные       | 10 – 1500             | 400                              |
| Голосеменные          | 4 – 150               |                                  |
| <u>Беспозвоночные</u> |                       |                                  |
| Черви                 | 500 – 1600            | 900                              |
| Насекомые             | 580 – 2000            |                                  |
| Моллюски              | 120 – 200             |                                  |
| <u>Позвоночные</u>    |                       |                                  |
| Рептилии              | 15-500                | 250                              |
| Амфибии               | 7 – 30                | 20                               |
| Рыбы                  | 6 – 55                |                                  |
| Птицы                 | 6 – 14                |                                  |
| <u>Млекопитающие</u>  |                       |                                  |
| Мелкие                | 8 – 15                | 6                                |
| Крупные               | 1,5 – 2,7             |                                  |
| <u>Человек</u>        | 2,5                   | 2,5                              |

[sheva\_medu\_mag01\_CHUMBALYK\_L\_1 RB#54]

радіочутливість



Радиочувствительность различных организмов: 1 – микроорганизмы; 2 – растения; 3 - холоднокровные животные; 4 – теплокровные животные; 5 – человек.