

Лабораторна робота № 6. 77

Дослідження поглинання гамма-випромінювання різними матеріалами.

Мета роботи: ознайомлення з основними закономірностями радіоактивного перетворення ядер, дозиметричними одиницями, освоєння методики виміру радіоактивності матеріалів і визначення лінійних коефіцієнтів ослаблення γ – випромінювання при проходженні через речовину.

Короткі теоретичні відомості

Атомне ядро складається із *протонів* і *нейтронів*. Протон p має позитивний заряд, рівний по абсолютній величині заряду електрона. Нейтрон n нейтральна частинка. Протони й нейтрони мають загальну назву *нуклони*. Сумарна кількість нуклонів у ядрі називається *масовим числом* A . Нуклонам (протону й нейтрону) приписується масове число $A=1$, електрону – $A=0$.

Заряд ядра дорівнює Ze , де e – заряд протона, Z – зарядове число. Воно дорівнює числу протонів у ядрі й збігається з порядковим номером елемента в періодичній таблиці елементів. Зарядове число протона $Z=1$, нейтрона $Z=0$, електрона $Z=-1$.

Різновиди атомів того самого хімічного елемента, ядра яких мають однакове число протонів Z (той самий заряд), але різне число нейтронів (різну масу) називаються *ізотопами*. Ізотопами називають також ядра таких атомів. Ядро прийнято позначати ${}_Z^AX$, де X – символ елемента. Наприклад, ${}_1^1H, {}_1^2H, {}_1^3H$ – ізотопи водню, ${}_{92}^{233}U, {}_{92}^{235}U, {}_{92}^{238}U$ – ізотопи урану.

Усі хімічні елементи з порядковим номером, що більший 82 (тобто починаючи з вісмуту), і деякі більш легкі елементи самовільно розпадаються з утворенням нових ядер і виділенням α –частинок – ядер атомів гелію ${}_2^4He$ (**α –розпад**), електронів або їх античастинок – позитронів, ${}_{-1}^0\beta, {}_{+1}^0\beta$ (**β –розпад**) і фотонів великої енергії (**γ –випромінювання**).

Довільне перетворення одних атомних ядер в інші, яке супроводжується випусканням частинок, називається **радіоактивністю**.

Потрапляючи в речовину, **α –частинки** непружно стикаються з атомами (молекулами), поступово втрачають свою енергію на іонізацію атомів і молекул, і зупиняються. Пробіг α –частинок до зупинки залежить від густини речовини й у повітрі за нормальних умов має величину порядку десятка мікрометрів. Звичайний аркуш паперу повністю екранує α –випромінювання. Від зовнішнього α –випромінювання легко захиститися, але воно надзвичайно небезпечно при внутрішньому опроміненні.

β – випромінювання — потік електронів або позитронів, які мають електричний заряд і, отже, високу іонізуючу здатність. Вони можуть проходити шар води товщиною 1-2 см. Для захисту від випромінювання звичайно достатньо аркуша алюмінію товщиною в кілька міліметрів. Але попадання джерел β – випромінювання в організм із їжею, водою й повітрям може привести до небезпечного внутрішнього опромінення організму.

Згідно з наведеним визначенням γ – **випромінювання** не є видом радіоактивності, оскільки воно не змінює складу ядра, а змінює тільки його енергію. Гамма-випромінювання виникає тільки тоді, коли ядро, яке з'являється в результаті розпаду іншого ядра, перебуває в збудженому стані. Воно випускається при переходах ядра зі збудженого енергетичного стану в основне. Енергія γ -кванта дорівнює різниці енергій станів, між якими відбувається квантовий перехід.

Гамма-випромінювання – це короткохвильове електромагнітне випромінювання. На шкалі електромагнітних хвиль воно граничить із жорстким рентгенівським випромінюванням, займаючи область більш високих частот. Воно має дуже малу довжину хвилі ($\lambda \leq 10^{-10}\text{м}$) і внаслідок цього поводить себе подібно потоку часток – γ -квантів, або фотонів.

Гамма-випромінювання має велику проникаючу спроможність, тобто може проникати крізь великі товщі речовини без помітного ослаблення. Для захисту від нього застосовують матеріали з великою густиною: свинець, бетон і т.п.

Основні процеси, що відбуваються при взаємодії гамма-випромінювання з речовиною:

- фотоелектричне поглинання (фотоефект);
- комптонівське розсіювання (комптон-ефект);
- утворення пар електрон-позитрон.

При фотоефекті відбувається поглинання γ -кванта одним з електронів атома, причому енергія γ -кванта перетворюється в кінетичну енергію електрона, що вилітає за межі атома. Фотоефект переважає в області малих енергій γ -квантів ($\sim 100\text{ кеВ}$, $1\text{еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$).

При комптон-ефекті відбувається розсіювання γ -кванта на одному з електронів, який слабо зв'язаний в атомі. На відміну від фотоефекта, при комптон-ефекті γ -квант не зникає, а лише змінює енергію (довжину хвилі) і напрямок поширення. Вузький пучок гамма-променів у результаті комптон-ефекту стає більш широким, а саме випромінювання – більш м'яким (довгохвильовим). Комптонівське розсіювання відбувається при енергіях γ -квантів $\sim 0,5\text{ МеВ}$, що значно перевищують енергію зв'язку електронів в атомах.

Якщо енергія γ -кванта перевищує $1,02\text{ МеВ}$, стає можливим процес утворення електрон-позитронних пар в електричному полі ядер: γ -квант перетворюється в пару електрон-позитрон.

Реєстрація випромінювання. Лічильник Гейгера-Мюллера

Для виміру β – й γ – випромінювань використовують різного роду радіометри, дозиметри та інші прилади. Принципова схема будь-якого дозиметричного приладу показана на рис.1. У якості детектора іонізуючого випромінювання часто застосовують газорозрядні лічильники Гейгера-Мюллера. Такий лічильник являє собою металеву тонкостінну трубку, уздовж осі якої протягнена тонка металева нитка. Трубка служить катодом, нитка – анодом. Між ниткою й стінками трубки прикладена напруга в кілька сотень вольтів. Герметичний резервуар заповнюється інертним газом при зниженому тиску $100\text{-}200\text{ мм. рт. ст.}$ Це робиться для збіль-

шення довжини вільного пробігу частинок і полегшення ударної іонізації газу.

Гамма-кванти реєструються по вторинним зарядженим частинкам - фотоелектронам, комптоновським електронам, електронно-позитронним парам.

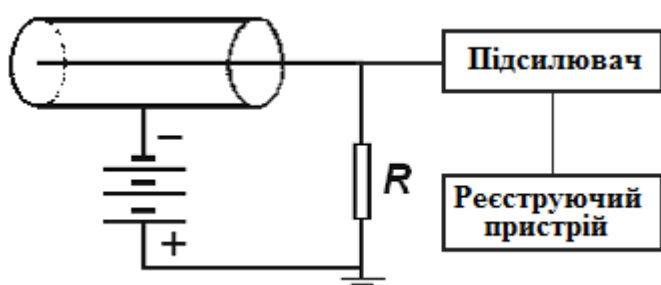


Рис. 1

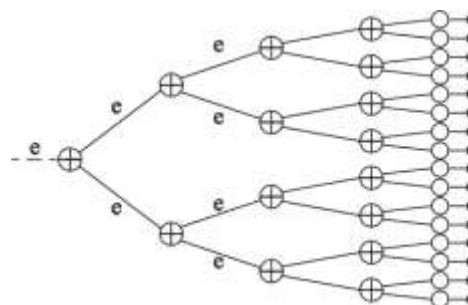


Рис. 2

Проникаючи усередину трубки, γ -випромінювання іонізує атоми газу на своєму шляху. Виникаючі вільні електрони рухаються до аноду (нитки).

Поблизу аноду напруженість електричного поля є великою, і електрони прискорюються настільки, що починають у свою чергу іонізувати газ (ударна іонізація). У міру наближення до аноду число електронів лавиноподібно наростає (рис. 2). За рахунок ударної іонізації виникає коронний розряд, що поширюється уздовж нитки, і струм через лічильник різко зростає. Імпульс напруги з резистора R підсилюється й реєструється. Поки триває розряд, лічильник не може реєструвати інші частки. Щоб лічильник міг реєструвати нову частку, необхідно погасити лавинний розряд. Для цього опір резистора R повинний бути великим, порядку 10^8 - 10^9 Ом. При проходженні струму на цьому резисторі виникає велике падіння напруги, внаслідок чого різко зменшується напруга між трубкою й ниткою (катодом і анодом), що приводить до припинення розряду.

Для зменшення тривалості розряду лічильник заповнюється аргоном з домішкою метану або парів спирту. Позитивні іони на шляху до катода при зіткненні з масивними молекулами метану або спирту нейтралізуються й уже не можуть вибити з катода електрони, необхідні для підтримки розряду. Час відновлення чутливості лічильника визначається часом дрейфу іонів до катода й становить близько 10^{-4} с.

Елементи дозиметрії

Поглиненою дозою випромінювання називається енергія, поглинена одиницею маси об'єкта, що опромінюється. Її розмірність Дж/кг. У СІ ця одиниця одержала назву **грей** (Гй). Часто використовується також позасистемна одиниця — **рад**: $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг}$, тобто $1 \text{ Гй} = 100 \text{ рад}$. Рад - велика одиниця виміру, і тому поглинені дози звичайно виражають у долях рад – сотих (сантирад), тисячних (мілірад) і мільйонних (мікрорад).

Людський організм поглинає енергію іонізуючих випромінювань, причому від кількості поглиненої енергії залежить ступінь променевих уражень. Але при опроміненні живих організмів виникаючі біологічні ефекти залежать не тільки від поглиненої дози, але й від виду випромінювання. Для вираження ступеня опромінення живого організму вводять поняття **еквівалентної дози**.

Щоб одержати значення еквівалентної дози, треба величину поглиненої дози помножити на «коефіцієнт якості випромінювання» Q . Біологічний вплив випромінювання прийнято порівнювати з ефектами від рентгенівського й γ - випромінювання, яке береться за еталон. Для нього за визначенням вважається $Q = 1$. Одиницею виміру еквівалентної дози в СІ слугує **зіверт (Зв)**: $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гй} \cdot Q$. Використовують також позасистемну одиницю — **бер** (біологічний еквівалент рентгена): $1 \text{ бер} = 1 \text{ рад} \cdot Q$, тобто **1 Зв = 100 бер**.

Для β - променів коефіцієнт якості випромінювання $Q \approx 1$. Для α - випромінювання й опромінення важкими іонами $Q \approx 20$.

Поглинена й еквівалентна дози характеризують вплив радіоактивного середовища на об'єкти, що опромінюються. Для характеристики радіаційного стану на місцевості й у приміщеннях використовують поняття **експозиційної дози**: кількість рентгенівського або γ - випромінювання, виражене в одиницях заряду одного знака, породженого ним внаслідок іонізації в одиниці маси сухого повітря в даній точці простору. Одиницею виміру в СІ є **Кл/кг**. На практиці часто використовують позасистемну одиницю — **рентген (Р)**: $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Доза іонізуючого випромінювання є тим більшою, чим більше є час опромінення. Тому використовують також поняття **потужності дози**: це відповідна (експозиційна, поглинена або еквівалентна) доза, віднесена до одиниці часу: 1 Р/год , 1 Зв/год и т. п.

У таблиці 1 наведений розподіл природної експозиційної дози за джерелами походження.

Таблиця 1. Природні джерела іонізуючого випромінювання

Джерела	Потужність еквівалентної дози (МЕД), мбер/год	Потужність еквівалентної дози (МЕД), мкЗв/год
Космічне випромінювання на рівні моря	30	
Поверхня Землі (грунт, вода)	50 ÷ 130	
Радіоактивні елементи в тілі людини	30	
Інші джерела	2	
Разом	112 ÷ 192	$\approx 0,15$

Наведені дози характеризують природне середовище проживання людини, а зазначені фактори опромінення діють уже мільйони років, створюючи природний фон іонізуючого випромінювання. Звичайно, діяльність людей вносить свої корективи. У природних гірських породах, у ґрунті й будівельних матеріалах міститься якась кількість радію, при розпаді якого виникає радіоактивний газ радон. Погана вентиляція може збільшити дозу опромінення, обумовлену вдиханням радону.

Штучні джерела опромінення наведені в табл. 2. З неї видно, що діяльність людини приблизно потроєє еквівалентну дозу. Основним джерелом додаткового опромінення є наше житло, медичні прилади, паління. При флюорографії пацієнт

одержує близько 370 мбер, при рентгенографії зуба – 3 мбер, при рентгеноскопії легенів – $2 \div 8$ бер!

За 70 років життя **від природного фону** людина набирає повну дозу близько **15 бер**. При виконанні аварійних робіт максимально накопичена доза опромінення не повинна перевищувати 25 бер. Короточасні незначні зміни складу крові спостерігалися при разових дозах $25 \div 75$ бер. Летальною дозою прийнято вважати $250 \div 300$ бер.

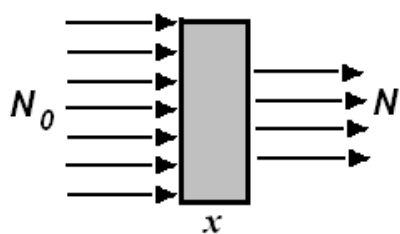
Таблиця 2. Середні річні дози від штучних джерел випромінювання

Джерела	Потужність еквівалентної дози (МЕД), мбер/год	Потужність еквівалентної дози(МЕД), мкЗв/год
Медична діагностика	$100 \div 150$	
Будівельні матеріали (перебування в будинках)	150	
Польоти в літаку (10 000 км на висоті 12 км)	$2,5 \div 5$	
Телевізор (4 г/сут)	1	
ТЭЦ(1 ГВт) на вугіллі на відстані до 20 км	$0,6 \div 6$	
АЕС (1 ГВт) на відстані до 20 км	$0,01 \div 0,1$	
Радіоактивні опади від випробувань ядерної зброї	2,5	
Інші джерела	40	
Разом	$300 \div 350$	0,3 – 0,35

Закон поглинання гамма-випромінювання

При проходженні γ -випромінювання через речовину (поглинач) γ -квант або поглинається цілком, або втрачає частину своєї енергії, змінюючи напрямок поширення. Тому в міру проходження через речовину число квантів у первісному пучку зменшується. Зменшення числа квантів у пучку залежно від товщини шару речовини відбувається за експонентним законом

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$



де N_0 – число квантів, зареєстрованих приладом без поглинача за час t ; N – число квантів, що пройшли через шар речовини товщиною x і зареєстрованих приладом за той же час t ; μ - **лінійний коефіцієнт поглинання**, що залежить від властивостей речовини й енергії γ -квантів.

Лінійний коефіцієнт поглинання згідно з визначенням має розмірність $[\mu] = \text{см}^{-1}$. Якщо логарифмувати (1), одержимо вираз для його обчислення

$$\mu = \frac{\ln(N_0/N)}{x}. \quad (2)$$

В однорідній речовині коефіцієнт ослаблення γ -випромінювання пропорційний числу зустрічних ядер n в одиниці об'єму цієї речовини

$$\mu = \sigma n, \quad (3)$$

де коефіцієнт пропорційності σ має розмірність площі (м^2) і називається ефективним перерізом сумарного поглинання γ -випромінювання. Концентрація частинок n пов'язана з густиною ρ поглинаючої речовини

$$n = \rho N_A / M. \quad (4)$$

З (3) і (4) одержуємо

$$\sigma = (\mu M) / (\rho N_A), \quad (5)$$

де M – молярна маса поглиначів, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$ – число Авогадро.

Прилади й приладдя: дозиметр «Терра», радіоактивний препарат, пластини досліджуваних матеріалів.

Виконання роботи

Ознайомтеся з дозиметром «ТЕРРА».

Для включення дозиметра необхідно короткочасно нажати кнопку РЕЖИМ. На цифровому індикаторі при цьому висвічується інформація. **Для вимикання** дозиметра потрібно знову нажати кнопку РЕЖИМ і втримувати її в натиснутому стані 4 с.

Після включення дозиметр автоматично переходить у режим виміру МЕД γ -випромінювання. Ознаками цього режиму є **висвітлення символу $\mu\text{Sv/h}$ (мкЗв/г)** на цифровому індикаторі й короткочасні слабкі звукові сигнали (кожний звуковий сигнал – це зафіксований квант γ - випромінювання). При цьому на індикаторі вже на перших секундах висвітлюються результати вимірів. Оскільки в дозиметрі передбачене постійне усереднення результатів виміру, то з кожним наступним відновленням значення на цифровому індикаторі відбувається процес його уточнення. Таким чином, **приблизно через хвилину** після початку вимірів на індикаторі **можна одержати результат**.

Для виміру **потужності еквівалентної дози (МЕД)** γ - випромінювання необхідно дозиметр орієнтувати міткою «+» на нижній кришці приладу в напрямку до досліджуваного об'єкта.

1. Виміряйте МЕД природного фону $N_{\text{ф}}$, обумовленого космічними променями й іншими джерелами. Вимір повторити три рази. Середнє значення фону треба віднімати з наступних вимірів.

2. Використовуючи джерело γ - квантів, виміряйте число імпульсів N_{0i} , які реєструє дозиметр під час відсутності поглиначів. Дозиметр при вимірі розміщуйте на відстані 15-20 см від джерела. Вимір повторити три рази. Визначите число γ – квантів, що випромінюються джерелом, враховуючи природний фон

$$N_0 = \langle$$

3. Закрийте детектор дозиметра поглиначем. Визначите кількість імпульсів N_i , викликаних γ – квантами, що пройшли через поглинач товщиною ℓ_i . Вимір повторити три рази. У якості поглиначів використовуйте пластини з Al , Fe , Pb різ-

ної товщини. Число часток, що пройшли через поглинач, з урахуванням природного фону дорівнює $N = \langle N_i \rangle - \langle N_\phi \rangle$.

4. Обмірювані й обчислені величини занесіть у таблицю 1.

5. Побудуйте графіки залежності $\ln(N_0 / N) = f(\ell_i)$ для всіх поглиначів.

Визначте коефіцієнти ослаблення μ , як тангенси кутів нахилу цих графіків.

6. Знаючи μ , для кожного поглинача обчислите товщину шару половинного ослаблення $x_{1/2}$.

7. За формулою (5) визначте ефективні перерізи поглинання для всіх поглиначів.

№	N_ϕ	$\langle N_\phi \rangle$	N_{0i}	$\langle N_{0i} \rangle$	N_0	Реч-на	ℓ_i	N_i	$\langle N \rangle$	$\ln \frac{N_0}{N}$	μ	$\mu_{1/2}$	σ
1													
2													
3													
·													
·													
·													

Контрольні питання

1. У чому полягає явище радіоактивності?
2. Назвіть особливості часток, які випромінюються в процесі радіоактивного розпаду ядер.
3. Які основні процеси відбуваються при взаємодії γ -випромінювання з речовиною?
4. Поясніть принцип дії лічильника Гейгера-Мюллера.
5. Як визначити еквівалентну дозу випромінювання? Її одиниці виміру.
6. Що називається експозиційною дозою й потужністю експозиційної дози випромінювання?
7. Запишіть і поясніть закон поглинання випромінювання.
8. Як визначити товщину шару половинного ослаблення?

Література

1. Трофімова Т.І. Курс загальної фізики. М.: «Академія». 2005
2. Лабораторний практикум по фізиці під ред. А.С. Ахматова. - М., «Вища школа», 1980.

Уклад Гаркуша І.П.