

Робота 7. ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ ЗБУДЖЕНОГО  
СТАНУ ЯДРА  $Fe^{57}$  (ЕФЕКТ МЕССБАУЕРА)

**Теоретичні відомості**

При випромінюванні або поглинанні  $\gamma$ -квантів частина їхньої енергії витрачається на віддачу випромінювача або поглинача. За законом збереження кількості руху імпульс випромінювача (поглинача) повинен дорівнювати імпульсу  $\gamma$ -кванта. При цьому імпульс поглинача напрямлений в напрямку руху  $\gamma$ -кванта, а імпульс випромінювача - в протилежному напрямку. При фіксованій масі випромінювача  $m$ ,

$$E_p = h\nu + \frac{mv^2}{2}, \quad \frac{h\nu}{c} = mv, \quad (1)$$

де  $E_p$  - енергія переходу, при якому ядро випромінює  $\gamma$ -квант,  $h\nu$  - енергія відповідного фотона,  $\frac{mv^2}{2}$  - кінетична енергія віддачі ядра випромінювача. Оскільки  $E_p \ll mc^2$ , швидкість руху ядер або атомів випромінювачів  $v$  завжди значно менша  $c$ , і можна використовувати нерелятивістське наближення, звідки

$$\frac{mv^2}{2} = R = \frac{p_\gamma^2}{2m} = \frac{E_p^2}{2mc^2}, \quad (2)$$

де  $p_\gamma$  - імпульс  $\gamma$ -кванта.

Таким чином, енергія випромінюваного кванта виявляється меншою від резонансної на величину енергії віддачі

$$R = \frac{E_p^2}{2mc^2}.$$

При поглинанні енергія падаючого кванта повинна бути (з врахуванням витрачання частини цієї енергії на віддачу поглинача) більшою від резонансної на ту ж величину. В результаті резонансні максимуми для випромінювача і поглинача виявляються віддаленими один від одного на відстань  $2R$ , і якщо  $2R \gg r$  (ширини збудженого рівня), то резонансна флюоресценція не може мати місця. Оскільки  $R \sim E_p^2$ , ефект віддачі особливо істотний при випромінюванні квантів ядрами атомів. При  $\gamma$ -випромінюванні  $R \gg r$ . В оптичній області спектра впливом віддачі можна знехтувати, оскільки  $R \ll r$ .

Збуджені рівні квантових систем характеризуються величиною резонансної енергії збудження  $E_{рез}$  та природною шириною  $r$ . Ця

ширина і середній час життя збудженого стану  $\tau$  зв'язані співвідношенням  $r\tau \approx \hbar$ . Ширина  $r$  визначає необхідну “точність настройки” для попадання в резонанс. При ядерних  $\gamma$ -переходах з випромінюванням  $\gamma$ -квантів конкурує процес внутрішньої електронної конверсії, при якому енергія збудження передається безпосередньо від ядра електронним оболонкам і витрачається на виривання атомних електронів. Цей процес збільшує ширину збудженого стану ядра.

Випромінюючі і поглинаючі  $\gamma$ -кванти ядра не перебувають у стані спокою. Вони беруть участь в тепловому русі. Частота  $\gamma$ -випромінювання  $\nu$  відносно тіл, що рухаються з деякою швидкістю  $v$  під кутом  $\theta$  до напрямку поширення випромінювання, зазнає доплерівського зсуву на величину

$$\Delta\nu = -\nu \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos\theta . \quad (3)$$

Ефект Доплера призводить до збільшення ширини резонансної лінії  $\gamma$ -випромінювання. Доплерівське розширення не впливає на величину інтегрального поглинання по всьому спектру, не відбувається при цьому і зміщення центра резонансної лінії, але зменшується величина поглинання в максимумі лінії. При сильному віддаленні ліній випромінювання і поглинання за рахунок віддачі ( $R \gg r$ ) доплерівське розширення не перешкоджає, а сприяє резонансній флюоресценції. Переріз резонансних процесів в цьому випадку визначається шириною області перекриття двох ліній природної і доплерівської ширини. Зменшення інтенсивностей випромінювання і поглинання в максимумах ліній супроводжується розширенням ліній із збільшенням області перекриття, яка досягає максимальної величини при  $k(T_{\text{випр}} + T_{\text{погл}}) = 2R$ ,  $k$  - стала Больцмана.

Якщо атом-випромінювач або поглинач входить до складу кристалічної ґратки, порушується однозначний зв'язок між  $p_\gamma$  і  $R$ , що мала місце для вільних атомів. Оскільки  $R$  менша, ніж енергія, необхідна для розриву хімічних зв'язків в ґратці, енергія віддачі призводить до збудження фононів або до зміщення кристала, як цілого. В обох випадках в формулу (2) входить маса всієї ґратки,  $R_{\text{крист}}$  (віддача кристала) мізерно мала,  $R \ll r$ . Тому віддача не перешкоджає спостереженню резонансної флюоресценції. Доплерівський зсув не залежить від маси випромінювача (поглинач), але для теплового руху, що визначає доплерівське зміщення, швидкість випромінювача  $v$

можна визначити із співвідношення  $\frac{\overline{mv^2}}{2} = kT$ . В результаті для атома в кристалічній ґратці доплерівська ширина рівня виявляється значно меншою від його природної ширини. Імовірність спостереження резонансної  $\gamma$ -флюоресценції на незміщеній лінії (тобто без віддачі) залежить від спектру нормальних коливань ґратки та від імовірності збудження коливальних рівнів.

Ефектом Мессбауера називається резонансна флюоресценція (випромінювання, поглинання, розсіяння)  $\gamma$ -квантів без віддачі, тобто без втрати частини енергії на віддачу випромінюючого або поглинаючого  $\gamma$ -квант ядра. Резонансні переходи в ядрах характеризуються надзвичайно високою чутливістю до найменших відхилень від резонансної енергії. В тих випадках, коли випромінююче або поглинаюче  $\gamma$ -квант ядро закріплене в кристалічній ґратці, виникає можливість сприймання імпульса віддачі вже не окремим ядром, а всією ґраткою, як цілим. При цьому енергія віддачі - обернено пропорційна масі випромінювача або поглинача - виявляється мізерно малою і вже не перешкоджає виконанню резонансних умов. В результаті стає можливим спостереження резонансної ядерної  $\gamma$ -флюоресценції і в таких умовах, коли вона надзвичайно чутлива до будь-яких зовнішніх факторів або впливів, здатних хоча б дуже мало змінити резонансну енергію. До таких зовнішніх факторів відносяться, зокрема, зміни густини фононних станів з температурою, відмінність хімічних станів ядер випромінювачів і поглиначів  $\gamma$ -квантів. Можливість кількісної характеристики подібних відмінностей з високою точністю за допомогою ефекта Мессбауера визначає його величезне значення.

### **Експериментальна частина.**

В процесі виконання роботи необхідно ознайомитися з методикою одержання мессбауерівських спектрів і визначити час життя збудженого стану ядра  $Fe^{57}$ . Робота виконується на спектрометрі ЯГРС-4М.

Існує два основні типи мессбауерівських спектрометрів: з постійною та із змінною швидкістю (рис.1). В спектрометрах з постійною швидкістю виконується серія послідовних вимірювань, в кожному з яких задається певна відносна швидкість руху джерела.



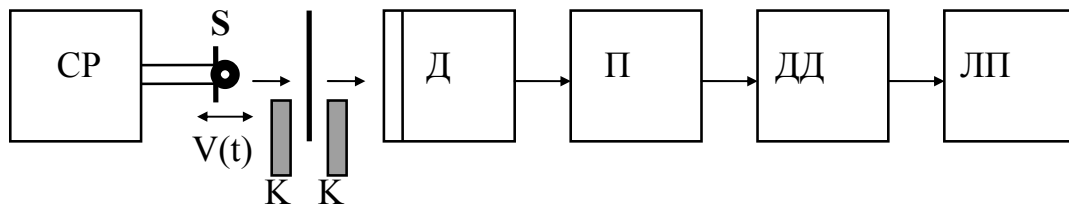


Рис.1. Блок-схема мессбауерівського спектрометра: СР - система руху, К - коліатор, А - мішень, S - радіоактивне джерело, Д - детектор, П - підсилювач, ДД - диференційний дискримінатор, ЛП - лічильний прилад.

Таким чином, кожна точка експериментальної кривої знімається окремо. Цьому відповідає прямокутний закон зміни швидкості системи руху (рис.2 а).

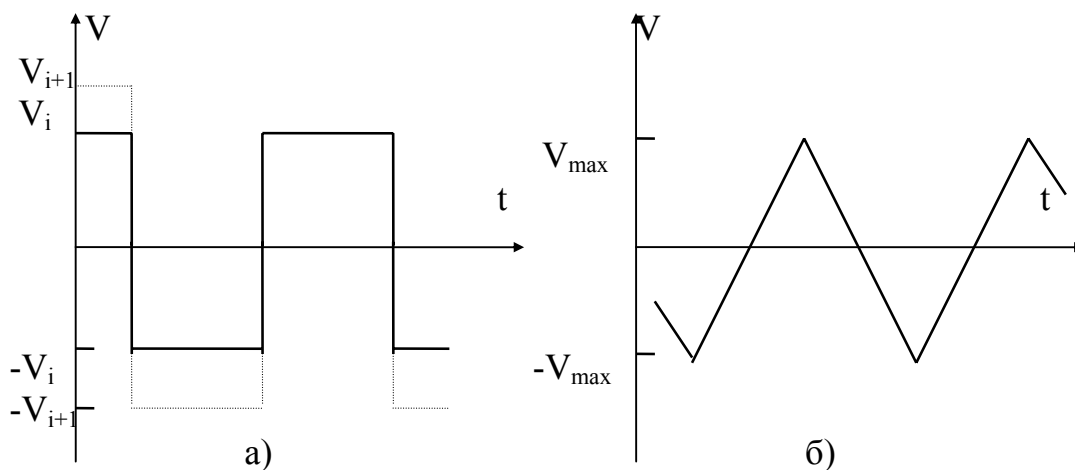


Рис.2. Закон зміни швидкості системи руху з постійною (а) та змінною (б) швидкістю.

В спектрометрах із змінною швидкістю швидкість джерела в кожному періоді вимірювання  $T$  неперервно змінюється від максимальної від'ємної до максимальної додатної і в зворотному напрямку за лінійним (рідше іншим) законом (рис.2 б). Імпульси детектора, що відповідають різним миттєвим швидкостям, розподіляються по різних каналах пам'яті багатоканального лічильного прилада (багатоканального аналізатора) таким чином, що встановлюється однозначна відповідність між номером каналу і величиною швидкості.

Спектрометри з постійною швидкістю не вимагають застосування багатоканальних аналізаторів, мають достатню точність, дають можливість детально досліджувати спектр в необхідному (наприклад вузькому) діапазоні швидкостей, а також підтримувати умови для постійного знаходження джерела та мішені в резонансі. Однак, якщо досліджуваний діапазон швидкостей великий, а виміри ведуться тривалий час, до них пред'являються достатньо жорсткі вимоги щодо стабільності електронної апаратури. В спектрометрах із змінною швидкістю вимоги до стабільності апаратури нижчі, оскільки на протязі періоду  $T$  системи руху вимірюються всі точки спектру.

Як джерело використовується нестабільний ізотоп  $Co^{57}$ , ядра якого введені в кристалічну ґратку іншою речовини, в даному випадку - хрому. Схема розпаду  $Co^{57}$  наведена на рис.3. В процесі розпаду  $Co^{57}$  перетворюється в  $Fe^{57}$ . Для дослідження мессбауерівського спектру резонансного поглинання заліза використовуються кванти з енергією  $E_0=14,4$  кеВ, що виникають внаслідок переходу з першого збудженого стану ядра  $Fe^{57}(3/2)$  в основний стан  $(1/2)$ . Поглиначем (мішенню) в експерименті з таким джерелом може бути фольга з нержавіючої сталі, що дає простий спектр поглинання (рис.4). ¶

Ефективна товщина поглинача вводиться таким чином. Закон поглинання  $\gamma$ -випромінювання в речовині

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} ,$$

де  $\mu$  - коефіцієнт поглинання,  $x$  - товщина поглинача,  $I_0$  - інтенсивність падаючого випромінювання,  $I$  - інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь поглинач,

можна переписати у вигляді

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho \cdot x)} = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \bar{x}} ,$$

де  $\rho$  - густина речовини,  $\mu_m = \mu/\rho$  - масовий коефіцієнт поглинання,  $\bar{x} = \rho \cdot x$  - ефективна товщина поглинача. Розмірність ефективної товщини  $\bar{x} = [г/см^2]$ . Зручність введення цієї величини в тому, що енергія, втрачена випромінюванням в середовищі, віднесена до товщини  $\bar{x}$  в грамах на  $1см^2$ , практично не залежить від агрегатного стану цього середовища. В даній роботі товщина різних поглиначів виражена в

τ

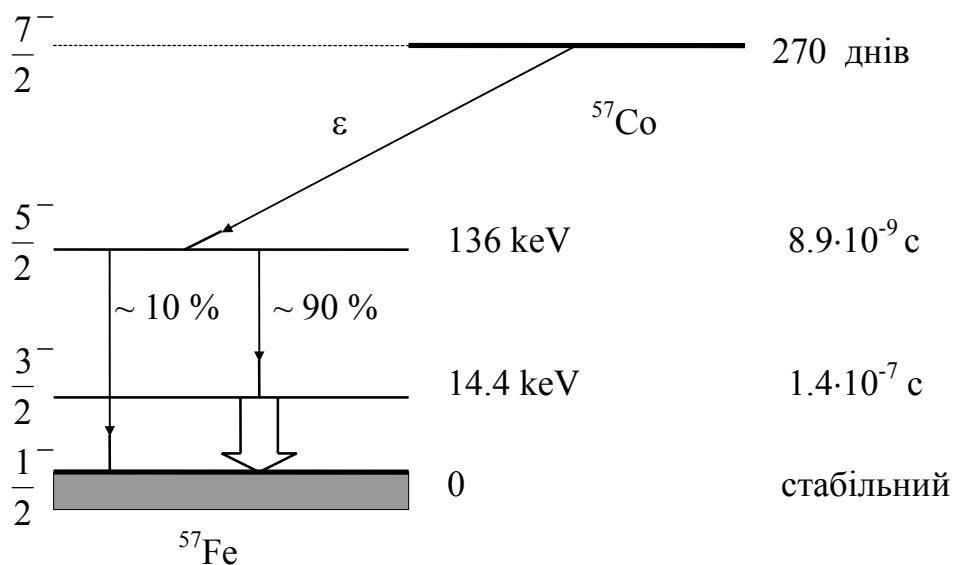


Рис.3. Схема розпаду ізотопу  $\text{Co}^{57}$ . Мессбауерівські кванти виникають при переході з першого збудженого стану ядра  $\text{Fe}^{57}$  в основний.

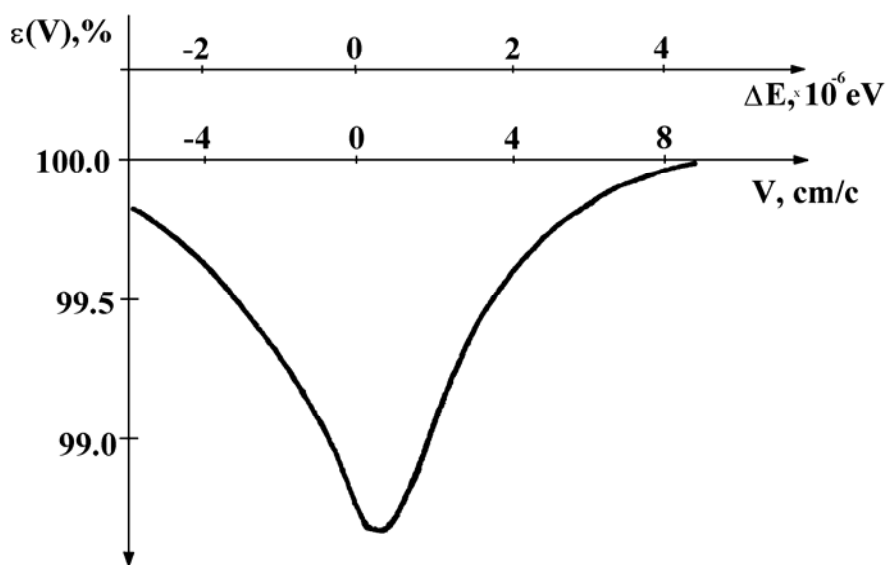


Рис.4. Мессбауерівський спектр резонансного поглинання нержавіючої сталі.

ефективній товщині по залізу  $\text{Fe}^{57}$ , мессбауерівський спектр поглинання якого ми і вивчаємо.

Діапазон енергій мессбауерівських квантів лежить в межах від 6 кеВ ( $\text{Ta}^{181}$ ) до 300 кеВ ( $\text{Pu}^{239}$ ). Для реєстрації  $\gamma$ -квантів в цій області використовують пропорційні, сцинтиляційні та напівпровідникові лічильники. Для ізотопа  $\text{Fe}^{57}$  найчастіше застосовуються сцинтиляційні детектори (рис.5).

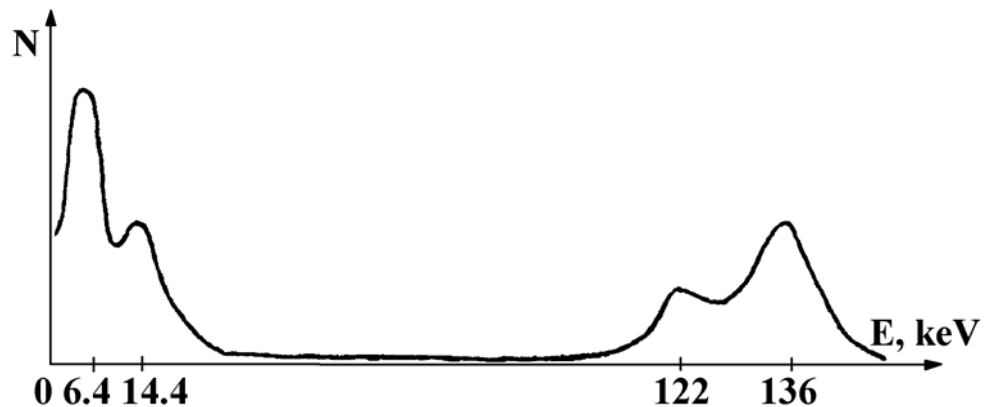


Рис.5. Амплітудний спектр  $\gamma$ -випромінювання джерела  $\text{Co}^{57}$ , виміряний сцинтиляційним детектором.

Мессбауерівську лінію з енергією 14,4 кеВ можна виділити диференційним дискримінатором. Ренгенівські кванти з енергією 6,4 кеВ супроводжують явище внутрішньої конверсії, що конкурує з випромінюванням мессбауерівського кванта при розпаді збудженого стану з  $E_0 = 14,4$  кеВ. З метою зменшення чутливості детектора до  $\gamma$ -квантів з енергіями 122 і 136 кеВ використовують достатньо тонкі (менше 1 мм) сцинтилятори.

Експериментальна установка (рис.6) забезпечує роботу в двох режимах: з постійною та із змінною швидкістю.

В першому випадку вібратор рухається по прямокутному закону зміни швидкості, для підрахунку мессбауерівських квантів використовується лічильний прилад. В другому - швидкість вібратора змінюється за трикутним законом, а вимірюваний спектр накопичується в багатоканальному аналізаторі. Робота електродинамічного вібратора контролюється осцилографом. Для реєстрації квантів застосовується сцинтиляційний детектор з кристалом  $\text{NaI(Tl)}$  товщиною 1 мм.

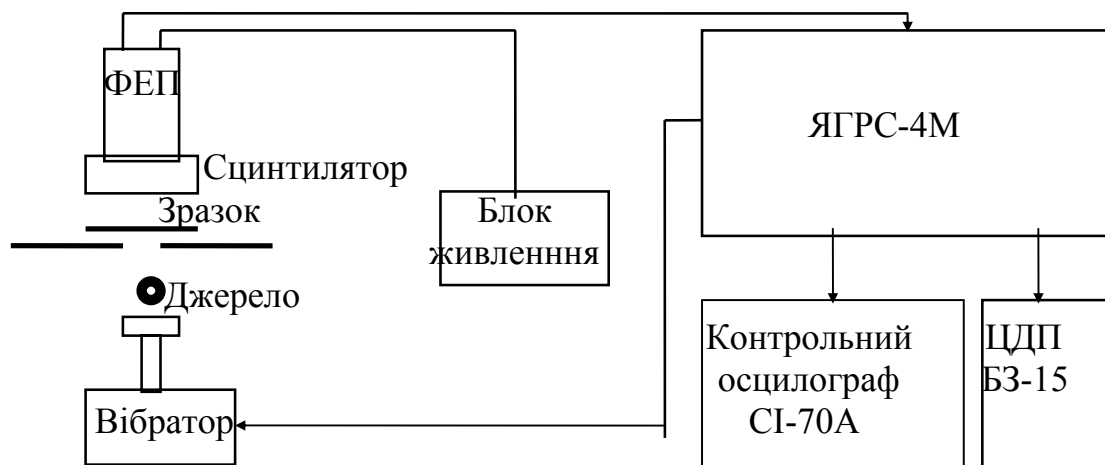


Рис.6. Схема експериментальної установки.

В процесі виконання роботи необхідно:

1. Підготувати спектрометр до роботи. Для цього:

- а) ввімкнути прилад і дати йому прогрітись не менше 30 хвилин;
- б) встановити блок детектування на відстані 50 см від джерела, закріпленого на рухомій частині вібратора. На відстані не більшій 10 см від джерела встановити мідний коліматор;

в) подати на блок детектування напругу живлення та високу напругу порядку 1100-1600 В. Переконайтесь у відсутності амплітудного перевантаження за допомогою осцилографа (не повинно бути зрізання вершини імпульсів, що відповідають  $\gamma$ -квантам з енергією 14,4 кеВ). У випадку перевантаження знизити високу напругу. Встановити перемикач ШИРИНА ОКНА в положення 1.0, перемикач КОНТРОЛЬ - в положення ІНТЕНСИВНОСТЬ. Змінюючи положення перемикача ПОРОГ ДИСКРИМИНАТОРА, переконайтесь по показах вимірювального приладу на передній панелі в наявності двох яскраво виражених пікових значень (що відповідає настройці дискримінатора на лінії 14 кеВ і 120 кеВ відповідно). Виконати старанну настройку дискримінатора на лінію 14 кеВ (пікове значення, що відповідає більш низькому порогу).

2. Виконати калібровку спектрометра. Для цього:

- а) жорстко закріпити зразок із залізної фольги товщиною 0,48 мг/см<sup>2</sup> по залізу Fe<sup>57</sup> в безпосередній близькості від нижнього краю екрану блока детектування. Перемикач ШИРИНА ОКНА встановити в



положення ИНТЕГРАЛ і виконати замір завантаження по входу (режим постійних швидкостей при нульовій швидкості);

б) змінюючи відстань між джерелом і блоком детектування, встановити завантаження по входу  $4 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ ;

в) зняти мессбаєрівський спектр залізної фольги, для цього встановити ручки керування в такі положення:

перемикач ПОСТОЯННЫЕ СКОРОСТИ - УСКОРЕНИЯ в положення ПОСТОЯННЫЕ СКОРОСТИ, перемикач РОД РАБОТЫ - в положення  $\wedge$ , перемикач ИНТЕРВАЛ НОМЕРА ТОЧКИ в положення 1, ручку перемикача ШАГ СКОРОСТИ в положення 1-5, перемикач НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ в положення 1, перемикач ЕМКОСТЬ РЕПЕРА в положення  $2^{13}$ , натиснути кнопки СТОП, СБРОС, СБРОС ПРОГРАММЫ, СБРОС на БЗ-15, дочекатись заспокоєння рухомої частини вібратора (3-5 хвилин) і натиснути кнопку ПУСК на пульті.

Після знімання спектру побудувати його, визначити положення резонансних ліній і враховуючи, що відстань між внутрішніми лініями  $v_1 - v_1' = 1,681 \text{ мм/с}$ , середніми  $v_2 - v_2' = 6,149 \text{ мм/с}$  і крайніми  $v_3 - v_3' = 10,617 \text{ мм/с}$  (рис.7), визначити ціну поділки одного каналу в одиницях швидкості  $(\delta V / \delta n)$ .

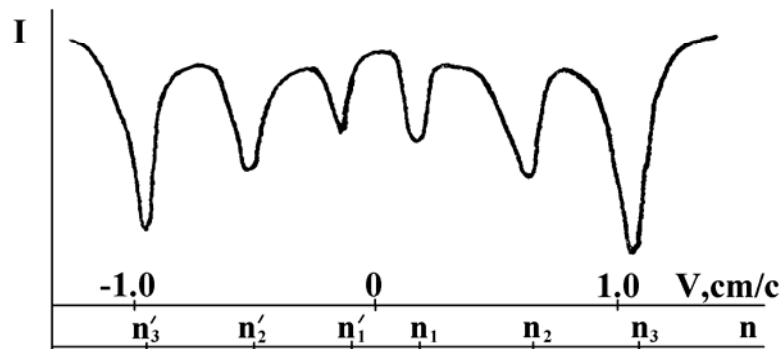


Рис.7. Мессбаєрівський спектр залізної фольги.

Знаючи  $n_1$  і  $n_1'$ ,  $n_2$  і  $n_2'$ ,  $n_3$  і  $n_3'$ , для кожної пари піків, можна визначити ціну поділки 1 каналу в одиницях швидкості, середнє значення та похибку.

3. Ширину лінії в мессбауерівському спектрі визначають вимірюванням мессбауерівського спектру на нітропрусиді натрію  $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  товщиною  $0,1 \text{ мг/см}^2$  по залізу-57 з джерелом  $\text{Co}^{57}$  в діапазоні швидкостей, що дозволяє вмістити обидва піки. Виміри проводяться на постійних швидкостях при положенні перемикача РОД РАБОТЫ  $\perp - \text{L} - \text{Г} - \text{Г}$  (реперне вимірювання). Для перерахунку номера каналу в швидкість використовується вираз  $v = n \cdot \left( \frac{\delta v}{\delta n} \right)$ .

4. Визначити ширину мессбауерівської лінії в одиницях швидкості  $\Gamma_v$  та енергії  $\Gamma$ . Врахувати, що вимірювана лінія насправді розширена через скінченну товщину мішені. З врахуванням поправочного коефіцієнта зв'язок між  $\Gamma_v$  і  $\Gamma$  визначається формулою:

$$\Gamma = \frac{E_0}{c} \cdot \frac{\Gamma_v}{2,02 + 0,29\bar{x} - 0,05\bar{x}^2},$$

де  $E_0 = 14,4 \text{ кеВ}$ ,  $\bar{x} = 0,1 \text{ мг/см}^2$  - ефективна товщина поглинача. Обчислити час життя збудженого стану  $\text{Fe}^{57}$ .

### Список літератури

Гольданский В.И. Эффект Мессбауэра и его применение в химии.-М., 1963.- 83 с.

Практикум по ядерной физике/Под ред. Башкирова Ш.Ш.- Казань, 1985.- С.103-122.

Вертхейм Г.К. Эффект Мессбауэра.- М., 1966.- 172 с.

Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. - М., 1980.- С.267-272.

Техническое описание и инструкция по эксплуатации спектрометра ЯГРС-2М. - М., 1975.- С.9-49.