

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко**

# **ЯДЕРНА ТА НЕЙТРОННА ФІЗИКА**

## **Практикум**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 143 «Атомна енергетика»»,  
спеціалізацією «Атомні електричні станції»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2018

Рецензент: *Горбаченко О. М.*, канд. фіз.-мат. наук.,  
Завідувач НДЛ «Ядерної спектроскопії» кафедри ядерної фізики, фізичного факультету  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Відповідальний  
редактор *Лебедь Н. Л.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 29.03.2018 р.)  
за поданням Вченої ради ТЕФ (протокол № 6 від 05.02.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Бондар Борис Михайлович*, канд. фіз.-мат. наук., асистент.  
*Лещенко Борис Юхимович*, канд. фіз.-мат. наук, доц.

## ЯДЕРНА ТА НЕЙТРОННА ФІЗИКА ПРАКТИКУМ

Ядерна та нейтронна фізика: Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 143 «Атомна енергетика», спеціалізації «Атомні електричні станції» / Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,71 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 24 с.

Посібник розроблено на підставі робочої програми кредитного модуля «Ядерна та нейтронна фізика» та призначено для якісної організації розв'язання студентами практичних задач при вивченні кредитного модуля, підвищення свідомості студентів у навчанні і поліпшення результатів навчання.

Авторами пропонується 70 задач для розв'язування на практичних заняттях, а також самостійного. Задачі охоплюють основні розділи дисципліни «Ядерна та нейтронна фізика».

Для кращого розуміння умов задач та успішного їх розв'язання подається коротка інформація про фізичні величини та одиниці їх вимірювання, про системи одиниць фізичних величин СІ та СГС. Рекомендуються способи вирішення задач. Додаються таблиці основних фізичних констант.

Призначений для студентів, які навчаються за освітньою програмою підготовки бакалаврів за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

© Б. М. Бондар, Б. Ю. Лещенко, 2018  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

## ЗМІСТ

1. Передмова .....	4
2. Основні поняття .....	4
2.1 Фізичні величини .....	4
2.2 Системи одиниць фізичних величин .....	5
2.3 Міжнародна система одиниць СІ (SI) .....	5
3. Розв'язування задач .....	5
4. Приклади розв'язування задач .....	6
5. Задачі з ядерної та нейтронної фізики .....	8
5.1. Властивості атомних ядер. Моделі ядер .....	8
5.2. Ядерні реакції .....	9
5.3. Радіоактивність. Статистичні флуктуації розпадів. Дозиметрія .....	10
5.4 Альфа- та бета- розпади .....	10
5.5. Гамма випромінювання. Типи та мультипольності гамма переходів	11
5.6. Нейтронна фізика .....	12
5.7. Ядерна енергетика .....	12
5.8. Фізика елементарних частинок .....	13
5.9. Ефект Месбауера .....	13
Додаток 1. Енергії зв'язку ядер, маси атомів, дефект маси .....	15
Додаток 2. Деякі константи та характеристики джерела Месбауера ...	16
Додаток 3. Одиниці фізичних величин .....	17
Додаток 4. Основні фізичні константи .....	19
Додаток 5. Розподіл навчального часу за видами занять і завдань	21
з дисципліни та система оцінки успішності студента ...	
Література .....	24

## 1. ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки призначені для допомоги в успішному засвоєнні матеріалу з дисципліни «Ядерна фізика та нейтронна фізика», запорукою якого є комплексне вивчення, що передбачає самостійне опрацювання студентами лекційного матеріалу, додаткової літератури, а також використання нових знань при розв'язуванні задач.

Прослухати лекцію – це тільки перший етап підготовки висококваліфікованого фахівця, який може творчо підходити до вирішення проблем, що виникають. Отриманою на лекціях чи самостійно інформацією необхідно володіти, тобто активно використовувати її в своїй діяльності. Щоб виробити це вміння, закріпити його, необхідно розв'язувати задачі. Спочатку прості, поступово переходити до більш складних. Серед задач, що пропонуються, є прості, але є і задачі, умови яких максимально наближені до реальних ситуацій. Наприклад, деякі з них мають надлишок даних, у інших – їх бракує. Це спонукає творчо підходити до розв'язання таких задач, думати, вибирати тільки необхідні дані з умови задачі, або знаходити їх у довідниках. Розв'язування таких задач навчає самостійно користуватися підручниками, довідниками та іншими джерелами інформації. Шляхів до розв'язку може бути декілька. Бажано проаналізувати кожний із них, вибрати оптимальний. Деякі задачі якісні. Для їх розв'язання необхідне введення додаткових умов, фізичних величин, обмежень. По суті — це вже самостійне наукове дослідження, тобто вивчення залежності однієї фізичної величини від зміни інших.

Успіху можна досягти тільки на шляху пізнання: **знати-уміти-творити**. Пройти цей шлях допоможуть вам задачі. Не зупиняйтеся на першому етапі пізнання. Задачі допоможуть вам у цьому.

Щоби виконати цю роботу якісно, необхідно мати достатню теоретичну підготовку. Перед тим, як приступити до розв'язування задач, треба обов'язково ознайомитися з такими поняттями як **фізична величина, значення фізичної величини та одиниця її вимірювання, системи одиниць**. Умови задач відповідають тій області знань, у якій студент є компетентним. У додатку 5 дано коротку інформацію про дисципліну «Ядерна фізика та нейтронна фізика», до якої належать рекомендовані задачі.

## 2. Основні поняття [1]

### 2.1 Фізичні величини

**Фізичними величинами** називають кількісні характеристики явищ природи (довжина, час, маса, швидкість і т. п.). Для кількісного вимірювання будь-якої фізичної величини вводиться **одиниця вимірювання** цієї фізичної величини.

**Значення фізичної величини** – це число одиниць вимірювання, прийнятих для даної фізичної величини. Наприклад:

Фізична величина – довжина.

Одиниця її вимірювання – метр.

Значення цієї фізичної величини – 2,3 метра.

Тут 2,3 – це число одиниць вимірювання довжини.

У природі фізичні величини пов'язані між собою кількісно певними рівняннями – законами природи (закон Ньютона, закон Кулона, закон радіоактивного розпаду і т.д.), а тому одиниці вимірювань теж пов'язані між собою відповідними рівняннями. При знаходженні розв'язку якогось рівняння не можна значення фізичних величин, що входять до нього, підставляти в будь-яких одиницях, довільно. Наприклад, довжину підставляти в сажнях, вузлах, милях, дюймах, метрах, сантиметрах, мікронах і т.п.

При розв'язуванні рівнянь необхідно користуватися певною сукупністю основних і похідних одиниць, що відносяться до деякої системи, яку називають системою одиниць фізичних величин.

## 2.2 Системи одиниць фізичних величин

Існувало багато одиниць вимірювання фізичних величин. Після введення міжнародних еталонів вимірювання довжини, ваги та часу в 1881 році на Першому міжнародному конгресі в Парижі було прийнято систему одиниць СГС (сантиметр, грам, секунда). У цій системі основними фізичними величинами було вибрано довжину, масу і час. Інші одиниці фізичних величин є похідними від основних. Наприклад, швидкість  $v=s/t$  має розмірність  $\text{СМС}^{-1}$ , і ця одиниця вимірювання швидкості є похідною від довжини та часу.

Розмірність фізичної величини – це вираз, що показує зв'язок цієї фізичної величини з основними фізичними величинами системи.

Буває, що різні фізичні величини мають однакову розмірність, але їх відрізняють за фізичним змістом. Так, наприклад, однакову розмірність Дж/кг мають одиниці вимірювання дози Грей і Зіверт.

При розширенні системи СГС на електродинамічні явища було введено системи СГСЕ (враховано електростатичні явища) та СГСМ (враховано електромагнітні явища), які будуються на основі закону Кулона.

## 2.3. Міжнародна система одиниць СІ (SI)

Міжнародна система одиниць СІ (SI) була прийнята в 1960 році, з часом доповнюється і вдосконалюється. Складається система з 7 основних одиниць, 2 додаткових та похідних одиниць, утворених від основних та додаткових. Основними одиницями є метр, кілограм, секунда, Ампер, Кельвін, моль, кандела. Додатковими одиницями є радіан, стерадіан. Похідні одиниці СІ групуються за розділами фізики (механіка, теплота, електрика і магнетизм, іонізуюче випромінювання, атомна та ядерна фізика і т.д.). Багато похідних одиниць носять прізвиська вчених (Ньютон, Герц, Паскаль, Джоуль, Ват, Кулон, Ом, Вольт і т.д.), а тому пишуться з великої букви.

Стандарт не обмежує застосування деяких позасистемних одиниць у наукових дослідженнях і публікаціях теоретичного характеру в області природничих наук. Так, серед позасистемних одиниць є одиниця енергії електронвольт (eV), що дозволяється до використання без обмеження в часі.

## 3. Розв'язування задач

Ще раз підкреслимо, що розв'язування задач – це ефективний шлях засвоєння інформації, отриманої на лекціях, перетворення цієї інформації в знання, якими активно користуються в практичній діяльності, набувають компетентності, з часом стають спеціалістами, професіоналами.

Перш за все, необхідно розуміння явищ природи, закономірностей, що пов'язують фізичні величини, тобто вміти пояснювати своїми словами явища природи, формулювати закони природи та математично записувати їх, знати, де і як їх можна застосовувати. Наприклад, формули для кінетичної енергії — різні для нерелятивістської та релятивістської частинок, також різні формули для енерговиділення при бета-мінус та бета-плюс розпадах і т.п.

При розв'язуванні задач потрібно дотримуватися певної методики:

1) уважно прочитати умову задачі, зрозуміти суть фізичних явищ та процесів, про які йдеться. Бажано показати їх на рисунку у схематичному вигляді (схема розпаду ядра, взаємне розташування об'єктів і т.п.). У багатьох випадках рисунок допомагає знайти вірний шлях розв'язування. Як правило, в задачі описуються умови, за яких відбувається якийсь процес, даються значення фізичних величин. Часто суть розв'язку задачі полягає в тому, щоб використовуючи відомі значення фізичних величин (із наведених в умові задачі — взяти тільки необхідні), а також підібравши потрібні дані (яких бракує в умові задачі) з таблиць, знайти невідоме значення;

2) записати деякі умови задачі в математичній формі згідно з відомими співвідношеннями та законами;

3) проаналізувати можливі шляхи пошуку невідомої величини та вибрати оптимальний варіант розв'язку;

4) провести обчислення.

Найбільше помилок трапляється при розв'язанні рівнянь, написаних у буквену вигляді. Щоб успішно пройти цей технічний етап обчислень, необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

а) вибрати систему одиниць, у якій будуть проводитись обчислення (СІ, СГС). Якщо користується готовою формулою із підручників чи довідників, уточніть, у якій системі одиниць вона написана. Дотепер багато формул та значень фізичних величин, констант подано в системах СГС, СГСЕ, СГСМ. А тому особливу увагу потрібно звертати на одиниці вимірювань, які стоять поряд із значенням фізичної величини, тобто в яких одиницях представлена фізична величина.

б) після написання формули в буквену вигляді справа пишемо знак дорівнює (“=”) і, не змінюючи послідовності розташування величин, підставляємо їх числові значення у вибраній системі одиниць із позначенням розмірності величин. Цей вираз є оригіналом, у якому нічого не можна змінювати (спрощувати, скорочувати, округлювати і т.п.)! За необхідності — знову пишемо знак рівності, переписуємо оригінал, тобто, отримуємо копію оригіналу, в якому вже можемо робити різні скорочення, спрощення, проміжні обчислення і т.д., поки не отримаємо кінцевий результат. Останній повинен мати числове значення і поряд - обов'язково! - його розмірність. При переведенні будь-якого значення фізичної величини з однієї розмірності в іншу (наприклад, сантиметри в мікрони, Джоулі в Мегаелектронвольти, або навпаки) необхідно обов'язково писати, яка величина на яку величину (коефіцієнт) ділиться чи множиться.

Якщо відповідь виявилася неправильною, то при такій формі запису обчислень буде легко знайти місце помилки. Розмірності біля величин теж можуть підказати: наприклад, що їх табличне значення не було переведено в потрібну систему одиниць; а також вони визначають розмірність кінцевого результату.

#### 4. Приклади розв'язування задач

##### Умова задачі 1:

1. Розмір ядра можна визначити з аналізу експериментів по розсіянню нейтронів. Оцінити мінімальну енергію нейтронів, необхідну для наших цілей.

##### Розв'язок:

Для нейтронів з імпульсом  $p$  довжина хвилі де Бройля  $\lambda = h / p$ . Пружне розсіяння нейтронів на ядрах будемо спостерігати тоді, коли довжина хвилі не перевищуватиме розмір ядра, тобто:  $\lambda < R_{\text{я}}$ . На центрах, розмір яких менший за довжину хвилі  $R < \lambda$  відбувається тільки дифракція хвилі. Якщо прийняти  $R_{\text{я}} \leq 10^{-14} \text{ м}$ , то енергія нейтронів повинна бути більшою за величину:

$$E_n \geq \frac{p^2}{2m_n} = \frac{h^2}{2m_n \cdot \lambda^2} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot 0.66 \cdot 10^{-15} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{с})^2}{2 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (10^{-14} \text{ м})^2} = 13.1 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 8 \text{ MeV}$$

**Відповідь:** мінімальна енергія нейтронів 8 МеВ.

##### Умова задачі 2:

2. Користуючись табличними значеннями атомних мас, дефектів мас та енергії зв'язку для ядер, визначити питому енергію зв'язку нуклона в ядрі  $\text{N}^{13}$ , а також енергію

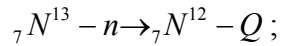
відділення нейтрона, енергію відділення протона і енергію приєднання протона для цього ж ядра.

**Розв'язок:**

Із таблиць знаходимо питому енергію зв'язку нуклона в ядрі  $N^{13}$ :

$$\varepsilon = \frac{Q_{зв}}{A} = 7,24 \frac{MeV}{\text{нуклон}}$$

1. Енергія відокремлення нейтрона від  ${}_7N^{13}$ :



$$Q = M({}_7N^{12} + n) - M({}_7N^{13}).$$

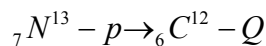
а) Використаємо значення атомних мас:

$$Q = (12,01861 + 1,008665) - 13,00574 = 0,021535 \text{ а.о.м} \cdot 931,48 \frac{MeV}{\text{а.о.м}} = 20 \text{ MeV}$$

б) Використаємо значення дефектів мас  $\Delta$ :

$$Q = (17,24 \text{ MeV} + 8,07 \text{ MeV}) - 5,35 \text{ MeV} = 20 \text{ MeV}$$

2. Енергія від'єднання протона від  ${}_7N^{13}$ :

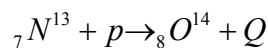


$$Q = M({}_6C^{12} + p) - M({}_7N^{13})$$

а)  $Q = (12,0 + 1,007825) - 13,00574 = 0,02085 \text{ а.о.м} \cdot 931,48 \frac{MeV}{\text{а.о.м}} = 1,94 \text{ MeV}$

б)  $Q = (0 \text{ MeV} + 7,29 \text{ MeV}) - 5,35 \text{ MeV} = 1,94 \text{ MeV}$

3. Енергія приєднання протона:



$$Q = M({}_7N^{13} + p) - M({}_8O^{14})$$

а)  $Q = (13,00574 + 1,007825) - 14,0086 = 0,004965 \text{ а.о.м} \cdot 931,48 \frac{MeV}{\text{а.о.м}} = 4,63 \text{ MeV}$

б)  $Q = (5,35 \text{ MeV} + 7,29 \text{ MeV}) - 8,01 \text{ MeV} = 4,63 \text{ MeV}$

**Висновки:**

1) Розрахунки можна проводити, користуючися значеннями атомних мас або дефектами мас атомів.

2) Енергії зв'язку окремих нуклонів із ядром можуть відрізнятися в десять разів і не збігатись із середнім значенням (питомою енергією зв'язку). Ці ефекти пов'язані з властивостями ядерних сил та законами квантової механіки і пояснюються оболонковою та узагальненою моделями ядра.

## 5. Задачі з ядерної та нейтронної фізики

### 5.1. Властивості атомних ядер. Моделі ядер

\* Енергія зв'язку ядра

$$E = [(Zm_p + Nm_n) - M(Z, A)]c^2$$

\* Дефект маси  $\Delta = M - A$ , або  $M = A + \Delta$ ,

тут  $M$  – маса атома

$A$  – атомне число в а.о.м. (маса атома округлена до цілого)

\* Розмір ядра  $R = r_0 \sqrt[3]{A} 10^{-15} \text{ м}$ ,  $10^{-15} \text{ м} = 10^{-13} \text{ см} = 1 \text{ фм}$ ,  $r_0 = 1,2 - 1,5 \text{ фм}$

\* В несферичному потенціалі деформованого ядра, що має осьову симетрію (еліпсоїд обертання), кожен із одноступінчатих енергетичних рівнів розщеплюється на  $(2I+1)/2$  підрівнів. Кількість розщеплень  $(2I+1)/2$  кожного із рівнів визначається величиною його спіна  $I$ , а відстань між рівнями залежить від знака та ступеня (величини) деформації ядра  $\Delta R/R$ . Парність зберігається для всіх підрівнів

3. Визначити питому енергію зв'язку нуклона в ядрі  $N^{13}$ , а також енергію відділення нейтрона, енергію відділення протона і енергію приєднання протона для цього ж ядра.

4. Вказати пару ядер, для яких енергія відокремлення і енергія приєднання протона дорівнюють одне одному.

5. Приймаючи, що лінійні розміри ядер легких атомів дорівнюють  $2 \text{ фм} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ , а розміри відповідних атомів мають порядок  $1 \text{ А} = 10^{-8} \text{ см}$ , оцінити густину ядерної речовини  $\rho_{\text{яд}}$ , виходячи з того, що густину звичайної речовини  $\rho$ , що складається з легких атомів, можна приблизно прирівняти до  $1 \text{ г/см}^3$  (густина води).

6. Із дослідів Резерфорда по розсіянню  $\alpha$ -частинок золотом (1911 р.) оцінити розмір ядра.

7. Яке ядро можна отримати в реакції  $\text{Kг}^{86} + \text{Pb}^{208}$  та яку енергію треба надати в прискорювачі ядру  $\text{Kг}^{86}$ , щоб відбувся синтез цього ядра?

8. Яке ядро можна отримати в реакції  $\text{Ca}48 + \text{Pu}244$  та яку енергію треба надати в прискорювачі ядру  $\text{Ca}48$ , щоб відбувся синтез цього ядра?

9. Розмір ядра можна визначити з аналізу експериментів по розсіянню нейтронів. Оцінити мінімальну енергію нейтронів, необхідну для наших цілей.

10. Порівняти густину ядерної матерії в ізотопах кисню та золота.

11. В якому діапазоні змінюється частота генератора високочастотного поля при стабілізації методом ЯМР магнітного поля мас-спектрометра в діапазоні 5–15 кілоггаусс (0,5–1,5 Тл). Як датчик використовується дистильована вода.

12. Намалювати розташування одноступінчатих енергетичних рівнів в узагальненій моделі ядра для нуклонів з орбітальним моментом 2, якщо ядро витягнуте. Вказати максимальну кількість нуклонів, що можуть знаходитись на кожному рівні, та парність рівнів.

13. Користуючись оболонковою моделлю, визначити парність ядра  ${}^8\text{Li}$ .

14. Користуючись оболонковою моделлю, визначити спін ядра  ${}^5\text{He}$ .



## 5.2. Ядерні реакції

\* Енергія ядерної реакції  $Q$  визначається різницею між сумарною масою (сумою мас) частинок, що вступають в реакцію (вхідний канал реакції) і сумарною масою (сумою мас) всіх частинок, що з'явилися після реакції (вихідний канал реакції).  $Q$  виражається в енергетичних одиницях [MeV].

$Q=(m_i+M_i)-(m_f+M_f+\dots)$  Можна користуватися дефектами мас.

\* Поріг ендотермічної ( $Q<0$ ) реакції  $E_{\text{п}}=(m_i+M_i)Q/M_i$

\* Кількість взаємодій в 1 с :  $n=\sigma N_1 N_2$

тут  $\sigma$  – поперечний переріз взаємодії,  $\text{см}^2$

$N_1$  – густина потоку частинок,  $1/\text{см}^2\text{с}$

$N_2$  – кількість ядер, що опромінюються потоком

15. Реакції синтезу ізоотопів водню при енергіях частинок в кілька десятків кілоелектроновольт часто використовуються як джерела нейтронів. Вирахувати енергію нейтронів у реакції дейтерію з тритієм. Енергії зв'язку ядер дейтерію, тритію та гелію відповідно дорівнюють 2,225 MeV, 8,482 MeV та 28,296 MeV.

16. При взаємодії протона з ядром літія-7 утворюється ядро берилій-7 та нейтрон. Написати цю реакцію та розрахувати енергію реакції  $Q$ . Енергії зв'язку ядер літія та берилію дорівнюють відповідно 39,25 MeV та 37,60 MeV.

17. Розрахувати енергетичний поріг реакції  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Енергії зв'язку ядер літію та берилію дорівнюють відповідно 39,25 MeV та 37,60 MeV.

18. Золото можна отримувати шляхом ядерних перетворень із інших хімічних елементів. Найшвидше цього можна досягнути на пучку нейтронів ядерного реактора, де потоки на виході горизонтальних каналів досягають величини  $10^{14}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \text{с})$ . Для теплових нейтронів найбільший переріз має реакція  $(n,\gamma)$ . Вважати середнє значення перерізу рівним 3000 барн. Виходячи з цього, підберіть вихідний хімічний елемент, що найкраще підходить для отримання стабільного ізотопа золота. Вирахувати кількість золота отриманого після неперервного опромінення протягом 1 години 1 кг вихідного матеріалу в потоці реакторних нейтронів. Вартість опромінення на реакторному пучку – 30 доларів/год. Оцінити вартість золота, отриманого таким способом.

19. Реакції синтезу ізоотопів водню при енергіях частинок в кілька десятків кілоелектроновольт часто використовуються як джерела нейтронів. Вирахувати енергію нейтронів у реакції дейтерію з дейтерієм.

20. Скільки  $\gamma$ -квантів попадає в детектор натрій-йод ( $\text{NaI(Tl)}$ ) зі вхідним діаметром вікна 40 мм, що розташований на відстані 1 м від зразка під кутом  $90^\circ$  до пучка нейтронів. Потік нейтронів з реактора  $10^8$  нейтронів на  $\text{см}^2$  за секунду. Зразок сферичної форми із заліза масою 60 г. Поперечний переріз реакції  $(n,\gamma)$  дорівнює 20 мбарн.

21. У досліді з прямою реєстрацією реакторних антинейтрино сцинтиляційними детекторами було зареєстровано 3 імп./год. від мішені об'ємом 200 л води з добавкою розчиненої солі кадмію. Написати реакцію та оцінити її поперечний переріз.

22. Реакцію  $\text{B}^{11}(p,\gamma)\text{C}^{12}$  часто використовують для калібровки прискорювача по енергії, оскільки поперечний переріз реакції стрімко зростає при  $E_p=163\pm 0,1$  кеВ до величини  $\sigma=2$  мікробарна і майже не змінюється при подальшому збільшенні енергії протонів. Енергії  $\gamma$ -квантів  $E_\gamma=4,43$  MeV, 11,57 MeV та 16 MeV також використовують для калібровки  $\gamma$ -спектрометрів в області високих енергій. Пояснити природу калібрувальних  $\gamma$ -ліній. Оцінити: а) максимальну енергію гама-квантів; б) скільки  $\gamma$ -квантів попаде в детектор з діаметром вхідного вікна 20 мм, що розташований на відстані 10 см від мішені під кутом  $90$  градусів відносно пучка протонів? Мішень: тонка плівка бору діаметром

15 мм, товщиною  $1 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>2</sup>. Енергія протонів 300 кеВ, діаметр пучка протонів на мішені 5мм, струм 10 мкА. Як провести розрахунок у випадку товстої мішені?

### 5.3. Радіоактивність. Статистичні флуктуації розпадів. Дозиметрія

- \* Закон радіоактивного розпаду:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda T = \ln 2$
- \* Активність джерела випромінювання  $A(t) = dN(t)/dt = \lambda N(t)$
- \* 1 Кюрі =  $3,7 \cdot 10^{10}$  розп/с =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Беккерель

23. Період напіврозпаду  $T_{1/2}$  радіоактивного ядра  $^{234}\text{Th}_{90}$  дорівнює 24,1 доби. Яка частина цих ядер розпадеться за одну добу?

24. Знайти питому активність плутонію  $^{239}\text{Pu}$ , який має період напіврозпаду  $2,4 \cdot 10^4$  років.

25. Вирахувати активність 1 г радію. Вибрати ізотоп з найменшою активністю.

26. Розрахувати товщину свинцевої пластини, яка знизить інтенсивність паралельного пучка гамма-квантів в 10 разів. Енергія гамма-квантів 1 МеВ, коефіцієнт ослаблення  $0,07 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ , густина свинцю  $11,35 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

27. Радіоактивне джерело знаходиться у свинцевому контейнері з товщиною стінки 5 см. У скільки разів зменшиться інтенсивність гамма-квантів на зовнішній поверхні контейнера? Енергія гамма-квантів 1 МеВ, коефіцієнт ослаблення  $0,07 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ , густина свинцю  $11,35 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

28. На відстані 1м потужність експозиційної дози точкового радіоактивного препарату в 5 разів перевищує рівень природнього фону. На якій відстані дозиметр покаже гранично допустиму дозу?

29. Детектором ядерного випромінювання зареєстровано 432 імпульси за 5 хв. 1) Визначити статистичну похибку отриманого результату. 2) Записати інтенсивність в імп/с, вказавши абсолютну та відносну похибки.

30. Детектором зареєстровано 412 імпульсів за 5 хв. Кількість фонових імпульсів за цей же час складає 330 імпульсів. Записати інтенсивність в імп/с, вказавши абсолютну та відносну похибки.

31. В організмі дорослої людини міститься 0.19% (за вагою) калію. Оцінити радіоактивність людини і визначити поглинуту дозу за  $\text{K}^{40}$  на рік.

32. Сіль КСІ часто використовують як еталон родіоактивності при градуїровці радіометричної апаратури. Визначити радіоактивність 100 г солі та навести основні характеристики цього джерела.

### 5.4 Альфа- та бета- розпади

- \* Енергія  $\alpha$ -розпаду  $Q_\alpha = M_i - (m_\alpha + M_f)$
  - \* Енергія  $\beta^-$ -розпаду та К-захвату  $Q = M_i - M_f$
  - \* Енергія  $\beta^+$ -розпаду  $Q = M_i - M_f - 2m_e c^2 (= 1,02 \text{ МеВ})$
- $M_i$  та  $M_f$  – маси початкового та кінцевого атомів

33. Чому енергетичний спектр  $\alpha$ -частинок, що виникають при  $\alpha$ -розпаді, дискретний, а енергетичний спектр електронів або позитронів, що виникають при  $\beta$ -розпаді, – суцільний?

34. Нерухоме ізомерне ядро  $^{81}\text{Se}$  з енергією збудження  $E^* = 103 \text{ кеВ}$  переходить в основний стан або випромінюючи  $\gamma$ -квант, або передаючи енергію конверсійному електрону К-оболонки відповідного атома (енергія зв'язку К-електрона дорівнює 12,7 кеВ). Знайти швидкості ядра віддачі в обох цих випадках.

35. Із нерухомого ядра  $\text{Ra}^{226}$  вилітає альфа-частинка з енергією  $E_\alpha = 4,78 \text{ МеВ}$ . Знайти енергію ядра віддачі.

36. Із нерухомого ядра  $Ra^{226}$  вилітає альфа-частинка. Знайти енергію альфа-частинки.

37. Чи може відбуватись  $\beta^+$ -розпад ядер  $Co-57$ ,  $Co-58$ ?

38. При  $\beta$ -розпаді ядра  ${}_5B^{12}$  зареєстровано електрон з енергією 4,4 МеВ. Яка енергія нейтрино в цьому розпаді?

39. Розпад ізотопу  $Co-58$  іде через рівень 0,8106 МеВ. Яка енергія  $\beta$ -переходу? Які гама-кванти зареєструє спектрометр?

40. Визначити максимальну енергію нейтрино  $\nu_e$  при розпаді нейтрона.

41. Написати схему розпаду тритію і визначити енергію, що при цьому виділилась.

42. Визначити енергію нейтрино при К-захваті в  ${}^{22}Na$ , якщо  $\beta$ -розпад іде через рівень 1,2745 МеВ дочірнього ядра.

43. Визначити максимальну енергію позитронів при розпаді  ${}^{22}Na$ , якщо відомо, що при цьому випромінюються  $\gamma$ -кванти з енергією 1,2745 МеВ.

44. Ядро  $K^{40}$  може розпадатись шляхом  $\beta^-$ -розпаду (90%) та шляхом К-захвату (10%) через рівень 1,461 МеВ дочірнього ядра. Визначити максимальну енергію нейтрино та антинейтрино.

45. Скільки енергії виділиться при радіоактивному перетворенні урану-238 в стабільний ізотоп?

### 5.5. Гамма випромінювання. Типи та мультипольності гамма переходів

\* Будь-який енергетичний рівень ядра характеризується значенням енергії  $E$ , спіна  $I$  та парності  $\pi$ , ( $E, I^\pi$ ). Наприклад, характеристика першого збудженого стану ядра  $Ni^{60}$  така: 1,33 МеВ,  $2^+$ . При переході ядра із вищого  $E_i$  в нижчий  $E_f$  енергетичний стан випромінюється гамма-квант з енергією  $E_\gamma = E_i - E_f$ . Перехід може супроводжуватись зміною спіна та парності. Зміна парності визначається так:

\* при **електричних** переходах  $EL$ :  $\frac{\pi_i}{\pi_f} = (-1)^{2L_E}$

\* при **магнітних** переходах  $ML$ :  $\frac{\pi_i}{\pi_f} = (-1)^{2L_M+1}$

тут  $L_E, L_M$  –момент кількості руху, що виноситься гамма-квантом при електричному або магнітному гамма-переході ядра із одного енергетичного рівня на інший. Можуть бути, наприклад, електричні дипольні  $E1$ , квадрупольні  $E2$ , октупольні  $E3$  і вищій мультипольності переходи. Аналогічно  $M1, M2, M3, \dots$

\* Ймовірність переходу  $P$  залежить від радіуса ядра  $R$ , довжини хвилі гамма-кванта  $\lambda$  та  $L$  і пропорційна

$$P \sim \left(\frac{R}{\lambda}\right)^{2L}$$

При збільшенні  $L$  на 1 ( $\Delta L=1$ ) ймовірність переходу зменшується на декілька порядків ( $\sim 10^5$ ). Електричний мультипольний перехід переважає магнітний тієї ж мультипольності.

46. Нерухоме ядро нікель– 60 з енергією збудження  $E^* = 1,33$  МеВ переходить в основний стан випромінюючи  $\gamma$ -квант. Знайти швидкість ядра віддачі.

47. Збуджене ядро зі спіном  $J_i = 2$  і парністю  $\Pi_i = +1$  переходить в нижчий енергетичний стан зі спіном  $J_f = 1$  і парністю  $\Pi_f = -1$  з випромінюванням гамма-кванта.

Які  $\gamma$ -кванти при цьому можуть випромінюватися і який з них утворюється з максимальною ймовірністю?

48. Збуджене ядро зі спіном  $J_i = 3/2$  і парністю  $\Pi_i = +1$  переходить в нижчий енергетичний стан зі спіном  $J_f = 1/2$  і парністю  $\Pi_f = +1$  з випромінюванням гамма-кванта. Які  $\gamma$ -кванти при цьому можуть випромінюватися і який з них утворюється з максимальною ймовірністю?

## 5.6. Нейтронна фізика

\* Паралельний вузький пучок нейтронів ослабляється пластиною, що має товщину  $x$ :

$$N(x) = N_0 e^{-n\sigma x} = N_0 e^{-\Sigma x} = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}, \quad \text{тут концентрація ядер речовини } n = \frac{\rho}{A} N_A$$

\* Летаргія в одному зіткненні  $\xi = \ln \frac{E_n}{E_{n+1}}$

49. Переріз поділу ядер природної суміші ізоотопів урану тепловими нейтронами  $\sigma$  дорівнює  $\sigma = 4,2$  барн. Знайти переріз  $\sigma_0$  поділу тепловими нейтронами ядер ізоотопу урану  $^{235}\text{U}$ .

50. Густина потоку теплових нейтронів у активній зоні реактора  $10^{14}$  нейтр.см $^{-2}$ с $^{-1}$ . Який буде потік нейтронів на зовнішній поверхні корпусу реактора, якщо корпус буде виготовлений із сталі товщиною 15 см? Поперечний переріз взаємодії  $\sigma = 2,6$  мбарн, густина заліза  $7,8$  г.см $^{-3}$

51. Користуючись таблицею атомних мас, визначити енергію приєднання нейтрона до ізоотопу  $^{235}\text{U}$ .

52. Користуючись таблицею атомних мас, визначити енергію приєднання нейтрона до ізоотопу  $^{238}\text{U}$ .

53. Оцінити енергію нейтронів, що спричиняють поділ ізоотопів урану. Енергія активації (бар'єр ділення) для U-235 та U-238 дорівнює відповідно 6,0 МеВ та 6,3 МеВ.

54. При розпаді  $^{137}\text{I}$  з енергією  $\beta$ -розпаду  $Q_\beta = 1,40$  МеВ (імовірність 0,06) виникають нейтрони. Знайти енергію цих нейтронів та час їх затримки.

55. При розпаді  $^{87}\text{Br}$  з енергією  $\beta$ -розпаду  $Q_\beta = 1,0$  МеВ (імовірність 0,06) виникають нейтрони. Знайти енергію цих нейтронів та час їх затримки.

## 5.7. Ядерна енергетика

56. Оцінити значення енергії, яка виділяється при одному акті поділу важкого ядра, виходячи з енергії зв'язку на один нуклон у важкому ядрі та у двох ядрах уламках середини періодичної системи елементів

57. Скільки енергії виділиться при поділі всіх ядер урану з сумарною масою 1г?

58. Яку мінімальну енергію необхідно надаги  $\alpha$ -частинці, щоб вона з'єдналась з ядром  $\text{Th}^{234}$ ?

59. Яка потужність АЕС (в кВт), якщо за одну добу вигорає 1 кг чистого урану?

60. Оцінити енерговиділення (потужність) 1 г урану- 235 за рахунок радіоактивного розпаду та порівняти його з енерговиділенням за рахунок ділення в активній зоні реактора при густині потоку теплових нейтронів  $10^{12}$  нейтронів/см $^2$ с.

61. Яке співвідношення було між ізотопами уран-235 та уран-238  $4,5 \cdot 10^9$  років тому?

62. Обчислити енергію, яка виділяється при повному згорянні 1г термоядерного пального з дейтерію і тритію в результаті реакції  $^2\text{H}_1 + ^3\text{H}_1 \rightarrow ^4\text{He}_2 + n$ .  $Q$  реакції дорівнює 17,6 МеВ.

## 5.8. Фізика елементарних частинок

63. При взаємодії космічного випромінення з атмосферою Землі виникає радіоактивний ізотоп  $^{14}\text{C}$ , який часто використовується для визначення віку археологічних знахідок. Напишіть ядерну реакцію утворення цього ізотопу. Оцініть вік археологічного предмету органічного походження, якщо відомо, що його активність по ізотопу  $^{14}\text{C}$  зменшилася вдвічі в порівнянні з рівноважною концентрацією ізотопу  $^{14}\text{C}$ , рівною 15 розпадам за хвилину на 1г вуглецю органічного походження. Період напіврозпаду вуглецю-14 дорівнює 5730 років.

64. У досліді з прямою реєстрацією реакторних антинейтрино сцинтиляційними детекторами було зареєстровано 3 імпл./год. від мішені об'ємом 200 л води з добавкою розчиненої солі кадмію. Написати реакцію та оцінити її поперечний переріз.

65. Показати схему  $\beta^+$  – розпаду ядра  $^{22}_{11}\text{Na}$  через проміжний бозон.

66. В експериментах по пошуку дипольного електричного моменту нейтрона  $d_n$ , що проводяться в науковому центрі PSI (Paul Scherrer Institut, Швейцарія), поляризовані ультра холодні нейтрони (УХН), що знаходяться в контейнері об'ємом 20 літрів, розміщують в зовнішнє магнітне поле з індукцією  $B=1$  мкТ та зовнішнє електричне поле з напруженістю  $E=10$  кВ/см. При відсутності електричного поля переорієнтація спіна нейтрона відбувається при дії на нього перпендикулярного до напрямку поляризації електромагнітного поля з частотою 29 Гц (частота прецесії, частота Лармора). При включенні електричного поля сумарна енергія взаємодії нейтрона з полями при наявності дипольного електричного моменту зміниться і буде дорівнювати  $\hbar\omega=2\mu_n B+2d_n E$ , що веде до зміни частоти прецесії нейтронів. Поки-що не вдалось помітити (зареєструвати) зміну резонансної частоти. Тобто, якщо і є зміна частоти, то вона лежить в межах точності (експериментальних похибок) вимірювань, а значення електричного моменту нейтрона  $d_n$  не перевищує величини  $d_n < 3 \cdot 10^{-26}$  е\*см. Користуючись результатами вимірювань обчислити магнітний момент нейтрона  $\mu_n$  в ядерних магнетонах. Оцінити точність вимірювань.

## 5.9. Ефект Месбауера

\* Енергія  $\gamma$ -кванта при наближенні до детектора (або віддаленні) зі швидкістю  $v$ :

$$E_\gamma = E_0 \pm \Delta E = E_0 \pm \frac{v}{c} E_0, \quad E_0 - \text{енергія } \gamma\text{-перехода в джерелі Месбауера}$$

67. З якою швидкістю  $v$  в якому напрямку відносно детектора необхідно переміщувати джерело  $\gamma$ -квантів, щоб спостерігати резонансне поглинання  $\gamma$ -квантів ядрами  $^{57}\text{Fe}$ , якщо зразок знаходиться при температурі вище температури Дебая?

68. Гама-кванти з енергією 14,4 кеВ месбауерівського джерела  $^{57}\text{Fe}$  рухаються вертикально вгору. Розрахувати зміщення енергії гама-квантів на висоті 100 м.

69. Гама-кванти з енергією 14,4 кеВ месбауеровського джерела  $^{57}\text{Fe}$  рухаються вертикально вгору. Яку частку власної ширини  $\gamma$ -лінії складає зміщення енергії гамма-квантів на висоті 100 м.

70. Пояснити наданий швидкісний спектр Месбауера, визначити магнітний момент та час життя збудженого стану (Рис 1).

71. Розшифрувати наданий швидкісний спектр Месбауера та визначити магнітне поле, в якому знаходились ядра  $^{57}\text{Fe}$  і час життя збудженого стану (Рис 1).

72. Пояснити наданий швидкісний спектр Месбауера, визначити градієнт електричного поля та час життя збудженого стану (Рис 2).

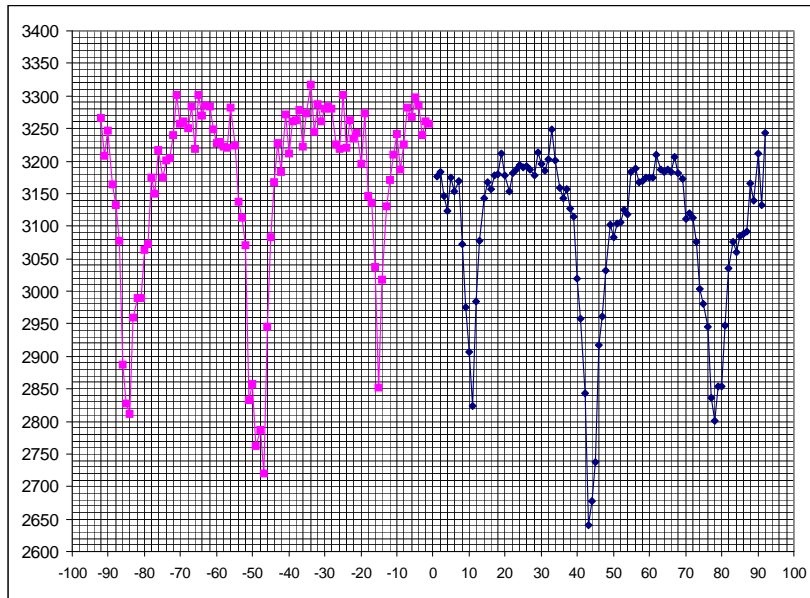


Рис. 1. Мессбауерівський спектр залісної фольги товщиною  $0,48 \text{ мг/см}^2$ . Відстань між внутрішніми лініями  $1,618 \text{ мм/с}$ , середніми –  $6,149 \text{ мм/с}$  і крайніми –  $10,617 \text{ мм/с}$ .

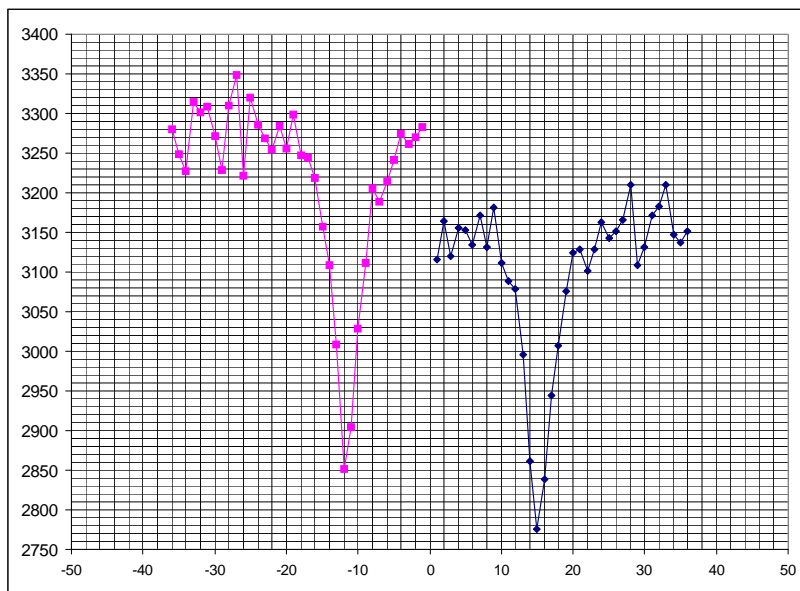


Рис. 2. Мессбауерівський спектр на нітропрусиді натрію товщиною  $0,1 \text{ мг/см}^2$ . Калібровка по Рис1.

**Енергії зв'язку ядер на нуклон ( $E_{зв}/A$ ), маси атомів ( $M_A$ ), дефект маси ( $\Delta$ )  
(вибране)**

Назва	z	A	$E_{зв}/A$ кеВ	$M_A$ аом.	$\Delta$ кеВ	Назва	z	A	$E_{зв}/A$ кеВ	$M_A$ аом.	$\Delta$ кеВ
п	0	1	0.0	1.008665	8071.3171	Fe	26	59	8754.743	58.934875	-60663.1
H	1	1	0.0	1.007825	7288.97050	Co	27	56	8694.82	55.939839	-56039.4
D(H)	1	2	1112	2.0141	13135	Co	27	57	8741.858	56.936291	-59344.2
T(H)	1	3	2827.266	3.016049	14949	Co	27	58	8738.947	57.935752	-59845.9
He	2	3	2572.681	3.016029	14931.21	Co	27	59	8768.013	58.933195	-62228.4
He	2	4	7073.915	4.002603	2424.915	Co	27	60	8746.746	59.933817	-61649
He	2	5	5481	5.01222	11390	Ni	28	56	8642.71	55.942132	-53904
Li	3	7	5606.291	7.0160	14908.14	Ni	28	57	8670.9	56.939793	-56082
Li	3	8	5159.582	8.022487	20946.84	Ni	28	58	8732.041	57.935342	-60227.7
Li	3	9	5037.84	9.0267	24954.3	Ni	28	59	8736.57	58.934346	-61155.7
Be	4	7	5371.400	7.016929	15770.03	Ni	28	60	8780.76	59.930786	-64472.1
Be	4	8	7062.435	8.0053	4941.67	Se	34	80	8710.819	79.9165	-77759.9
Be	4	12	5720.8	12.027	25077	Se	34	81	8686.005	80.91799	-76389.5
B	5	И	6927.71	11.0093	8667.9	Se	34	82	8693.198	81.9166	-77594
B	5	12	6631.26	12.01435	13368.9	Br	35	87	8605.51	86.920711	-73857
C	6	12	7680.144	12	0.0	Kr	36	85	8698.562	84.9125	-81480.3
C	6	13	7469.849	13.0033	3125.01	Kr	36	86	8712.027	85.91061	-83265.57
C	6	14	7520.319	14.00324	3019.893	Kr	36	87	8675.282	86.9133	-80709.43
N	7	12	6170.144	12.01861	17338.1	Te	52	137			69560
N	7	13	7238.863	13.00574	5345.48	I	53	137	8327.07	136.917871	-76503
N	7	14	7475	14.003	2863	Xe	54	136	8396.16	135.907219	-86425
O	8	13	5812	13.02	23112	Xe	54	137	8364.26	136.911562	-82379
O	8	14	7052.308	14.0086	8007.36	Xe	54	138	8346	137.913950	-80150
O	8	15	7463.69	15.003	2855.6	Cs	55	136	8389.770	135.907311	-86338.7
O	8	16	7976.206	15.9949	-4737.00141	Cs	55	137	8388.956	136.907089	-86545.6
Ne	10	21	7971.713	20.993846	-5731.78	Cs	55	138	8360.15	137.911017	-82887
Ne	10	22	8080.465	21.991385	-8024.715	Ba	56	136	8402.755	135.904575	-88886.9
Ne	10	23	7955.255	22.994466	-5154.05	Ba	56	137	8391.827	136.905827	-87721.2
Na	11	21	7765.52	20.997655	-2184.2	Ba	56	138	8393.42	137.905247	-88261.6
Na	11	22	7915.709	21.9944	-5182.4	Au	79	197	7915.661	196.966	-31141.1
Na	11	23	8111.493	22.989769	-9529.8536	Pb	82	206	7875.361	205.9744	-23785.4
Mg	12	22	7662.63	21.9995	-397.0	Pb	82	207	7869.865	206.9758	-22451.9
Cl	17	35	8520.278	34.9688	-29013.54	Pb	82	208	7867.452	207.9767	-21748.5
Cl	17	37	8570.28	36.9659	-31761.53	Pb	82	209	7848.647	208.9810	-17614.4
Ar	18	37	8527.139	36.966776	-30947.66	Po	84	218	7731.521	218.0089	8358.3
Ar	18	39	8562.59	38.964313	-33242	Rn	86	222	7694.491	222.0175	16373.6
Ar	18	40	8595.259	39.962383	-35039.89	Ra	88	225	7667.581	225.023612	21994
Ar	18	41	8534.371	40.96450	-33067.5	Ra	88	226	7661.956	226.0254	23669.1
K	19	37	8339.847	36.97337	-24800.2	Ra	88	227	7648.297	227.0291	27179
K	19	38	8438.057 *	37.9690	-28800	Th	90	233	7602.886	233.0415	38733.2
K	19	39	8557.020	38.96431	-33807.01	Th	90	234	7596.849	234.0436	40614
K	19	40	8538.083	39.9639	-33535.2	Th	90	235	7583.37	235.0475	42260
K	19	41	8576.061	40.961825	-35559.07	U	92	234	7600.708	234.0433	38146.6
Ca	20	39	8369.46	38.97072	-27274.4	U	92	235	7590.907	235.0439	40920.5
Ca	20	40	8551.301	39.96259	-34846.27	U	92	236	7586.477	236.0456	42446.3
Ca	20	41	8546.703	40.96228	-35137.76	U	92	237	7576.094	237.0487	45391.9
Ca	20	48	8666.47	47.952534	-44214	U	92	238	7570.120	238.0508	47308.9
Sc	21	39	8013.3	38.98479	-14168	U	92	239	7558.557	239.0543	50573.9
Sc	21	40	8173.67	39.9779	-20523.2	Pu	94	239	7560.311	239.0522	48589.9
Sc	21	41	8369.198	40.96925	-28642.39	Pu	94	244	7524.817	244.0642	59806
Sc	21	42	8444.935	41.9655	-32121.24						
Fe	26	56	8790.323	55.934937	-60605.4						
Fe	26	57	8770.249	56.935394	-60180.1						
Fe	26	58	8792.221	57.933275	-62153.4						

## Періоди напіврозпаду ядер

1

Назва	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra	Ra
Z	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
A	228	227	226	225	224	223	222	221	220	219	218
T <sub>1/2</sub>	5.75 роки	42.2 хв.	1600 років	14,9 днів	3,66 дні	11,4 дні	38 с	28 с	25 мс	10 мс	25.6 мкс

a.o.m.= $1.66056 \cdot 10^{-27}$  кг, 1 a.o.m.=931.502 MeB, m<sub>p</sub>=938.272 MeB, m<sub>n</sub>=939.565 MeB

$$\mu_N = e\hbar / (2m_p) = 0.315 \cdot 10^{-11} \text{ eB} / \text{Гс}; \quad \ln 2 = 0.69314718$$

$$\mu_p = 2.79\mu_N; \quad \ln 3 = 1.09861229$$

$$\mu_n = -1.9\mu_N; \quad \ln 5 = 1.60943791$$

$$1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^{19} \text{ м} / \text{Ф};$$

$$\hbar = 0.66 \cdot 10^{-15} \text{ eB} \cdot \text{с}$$

Ізотоп	Розповсюдженість у природі
$^{35}_{17}\text{Cl}$	75.77%
$^{37}_{17}\text{Cl}$	24.23%
$^{37}_{18}\text{Ar}$	0.063%
$^{39}_{19}\text{K}$	93.026%
$^{40}_{19}\text{K}$	0.0117%
$^{41}_{19}\text{K}$	6.73%

Характеристики Месбауерівського джерела  $^{57}_{26}\text{Fe}$  [2]

$$E = 14.4125 \text{ кеВ}$$

$$T = 9.77 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

$$\Gamma = 4.6697 \cdot 10^{-12} \text{ кеВ}$$

$$\Delta\nu(\Gamma) = 0.09713 \text{ мм} / \text{с}, \text{ Доплер ширина рівня}$$

$$E_{\text{віддачі}} = 1.9567 \cdot 10^{-6} \text{ кеВ}$$

$$I_0 = (1/2)^-$$

$$I_1 = (3/2)^-$$

$$\mu_0 = 0.09024\mu_N$$

$$\mu_1 = 0.1547\mu_N$$

$$Q_0 = 0 \text{ барн}$$

$$Q_1 = +0.33 \text{ барн}$$

$$\Delta = E_i - E_k = E(3/2, 3/2) - E(3/2, 1/2) = 1/2(dE/dx)eQ$$

$\Delta$  - квадрупольне розщеплення ядерних рівнів (месбауерівської лінії) при взаємодії квадрупольного момента Q ядра з неоднорідним полем, що існує в місці розташування ядра,

$E_i, E_k$  - власні значення гамільтоніана квадрупольної взаємодії, що належать різним значенням спіна ядра та магнітного квантового числа  $m_i$

$dE/dx$  - аксіально-симетричний градієнт електричного поля для значення  $I = 3/2$ .

Материнські ядра:



$^{57}_{25}\text{Mn}, (\beta^-), 1.7 \text{ хв}$

$^{57}_{27}\text{Mn}, (\varepsilon), 270 \text{ днів}$

## Одиниці фізичних величин [4]

Додаток 3

### Позначення та назви деяких одиниць

А – ампер	Гц – герц	Мкс – максвелл
Å – ангстрем	дин – дина	Н – ньютон
а.е.м. – атомна одиниця маси	Дж – джоуль	хв – хвилина
Б – бел	дптр – діоптрія	Па – паскаль
б – барн	К – кельвін	рад – радіан
Бк – беккерель	кал – калорія	с – секунда
В – вольт	кд – кандела	Ср – стерадіан
Вб – вебер	Кл – кулон	Тл – тесла
Вт – ват	л – літр	Ф – фарад
Гн – генрі	лк – люкс	год – година
г – грам	лм – люмен	Е – ерстед
Гс – гаус	м – метр	еВ – електрон-вольт

### Десяткові приставки до назв одиниць

Е – екса $10^{18}$	к – кіло $10^3$	мк – мікро $10^{-6}$
П – пета $10^{15}$	г – гекто $10^2$	н – нано $10^{-9}$
Т – тера $10^{12}$	д – деци $10^{-1}$	п – піко $10^{-12}$
Г – гіга $10^9$	с – санти $10^{-2}$	ф – фемто $10^{-15}$
М – мега $10^6$	м – мілі $10^{-3}$	а – атто $10^{-18}$

### Одиниці величин в СІ та СГС

Величина	Одиниця величини		Відношення $\frac{\text{од.СІ}}{\text{од.СГС}}$
	СІ	СГС	
Довжина	м	см	$10^2$
Час	с	с	1
Швидкість	м/с	см/с	$10^2$
Прискорення	м/с <sup>2</sup>	см/с <sup>2</sup>	$10^2$
Частота коливань	Гц	Гц	1
Кругова частота	с <sup>-1</sup>	с <sup>-1</sup>	1
Кутова швидкість	рад/с	рад/с	1
Кутове прискорення	рад/с <sup>2</sup>	рад/с <sup>2</sup>	1
Маса	кг	г	$10^3$
Густина	кг/м <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	$10^{-3}$
Сила	Н	дин	$10^5$
Тиск	Па	дин/см <sup>2</sup>	10
Імпульс	кг·м/с	г·см/с	$10^5$
Момент сили	Н·м	дин·см	$10^7$
Енергія, робота	Дж	ерг	$10^7$
Потужність	Вт	ерг/с	$10^7$

Густина потоку енергії	Вт/м <sup>2</sup>	ерг/(с·см <sup>2</sup> )	10 <sup>3</sup>
Момент імпульсу	кг·м <sup>2</sup> /с	г·см <sup>2</sup> /с	10 <sup>7</sup>
Момент інерції	кг·м <sup>2</sup>	г·см <sup>2</sup>	10 <sup>7</sup>
В'язкість	Па·с	П	10
Температура	К	К	1
Теплоємність, ентропія	Дж/К	ерг/К	10 <sup>7</sup>
Кількість електрики	Кл	СГСЕ-од.	3·10 <sup>9</sup>
Потенціал	В	СГСЕ-од.	1/300
Напруженість електричного поля	В/м	СГСЕ-од.	1/(3·10 <sup>4</sup> )
Електричне зміщення	Кл/м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	12π·10 <sup>5</sup>
Електричний момент диполя	Кл·м	СГСЕ-од.	3·10 <sup>11</sup>
Поляризованість	Кл/м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	3·10 <sup>5</sup>
Ємність	Ф	см	9·10 <sup>11</sup>
Сила струму	А	СГСЕ-од.	3·10 <sup>9</sup>
Густина струму	А/м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	3·10 <sup>5</sup>
Опір	Ом	СГСЕ-од.	1/(9·10 <sup>11</sup> )
Питомий опір	Ом·м	СГСЕ-од.	1/(9·10 <sup>9</sup> )
Провідність	См	СГСЕ-од.	9·10 <sup>11</sup>
Магнітна індукція	Тл	Гс	10 <sup>4</sup>
Магнітний потік	Вб	Мкс	10 <sup>8</sup>
Напруженість магнітного поля	А/м	Е	4π·10 <sup>-3</sup>
Магнітний момент	А·м <sup>2</sup>	СГСЕ-од.	10 <sup>3</sup>
Намагніченість	А/м	СГСЕ-од.	10 <sup>-3</sup>
Індуктивність	Гн	см	10 <sup>9</sup>
Сила світла	кд	кд	1
Світловий потік	лм	лм	1
Світимість	лм/м <sup>2</sup>		
Яскравість	кд/м <sup>2</sup>		

*Примітка.* Електричні та магнітні одиниці в СГС тут дані в гаусовій системі.

#### Деякі позасистемні одиниці

1 рік = 3,156·10 <sup>7</sup> с	1 Å = 10 <sup>-8</sup> см
1 атм = $\begin{cases} 101,3 \text{ кПа} \\ 760 \text{ мм.рт.ст.} \end{cases}$	1 б = 10 <sup>-24</sup> см
1 бар = 100 кПа (точно)	1 еВ = $\begin{cases} 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \\ 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ерг} \end{cases}$
1 мм.рт.ст. = 133,3 Па	1 а.е.м. = $\begin{cases} 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 931,5 \text{ МеВ} \end{cases}$
1 л·атм = 101,3 Дж	
1 кал = 4,18 Дж	1 Кі (кюрі) = 3,70·10 <sup>10</sup> Бк

Швидкість світла в вакуумі	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м / с}$
Гравітаційна стала	$\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / \text{кг} \cdot \text{с}^2$
Стандартне прискорення вільного падіння	$g = 9,807 \text{ м / с}^2$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стандартний об'єм моля газу	$V_0 = 22,41 \text{ л / моль}$
Молярна газова стала	$R = 8,314 \text{ Дж / (К} \cdot \text{моль)}$
Стала Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К}$
Стала Фарадея	$F = 0,965 \cdot 10^5 \text{ Кл / моль}$
Елементарний заряд	$e = \begin{cases} 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЕ} \end{cases}$
Маса електрона	$m_e = \begin{cases} 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \\ 0,511 \text{ МеВ} \end{cases}$
Питомий заряд електрона	$e / m_e = \begin{cases} 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл / кг} \\ 5,27 \cdot 10^{17} \text{ СГСЕ / з} \end{cases}$
Маса протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Питомий заряд протона	$e / m_p = \begin{cases} 0,959 \cdot 10^8 \text{ Кл / кг} \\ 2,87 \cdot 10^{14} \text{ СГСЕ / з} \end{cases}$
Стала Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = \begin{cases} 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ 0,659 \cdot 10^{-15} \text{ еВ} \cdot \text{с} \end{cases}$
Стала Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Стала закону зміщення Віна	$b = 0,29 \text{ см} \cdot \text{К}$

Стала Рідберга	$R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$ $R' = R / 2\pi c = 1,097 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$
Перший борівський радіус	$r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Енергія зв'язку електрона в атомі водню	$E = 13,56 \text{ eV}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda_C = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ $\tilde{\lambda}_C = \lambda_C / 2\pi = 3,86 \cdot 10^{-13} \text{ м}$
Класичний радіус електрона	$r_e = 2,82 \cdot 10^{-15} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = \begin{cases} 0,9274 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{Тл} \\ 0,9274 \cdot 10^{-20} \text{ ерг} / \text{Гс} \end{cases}$
Ядерний магнетон	$\mu_N = \begin{cases} 5,051 \cdot 10^{-27} \text{ Дж} / \text{Тл} \\ 5,051 \cdot 10^{-24} \text{ ерг} / \text{Гс} \end{cases}$
Магнітний момент протона	$\mu_p = 2,7928 \mu_N$
Магнітний момент нейтрона	$\mu_n = -1,913 \mu_N$
Атомна одиниця маси	$1 \text{ a.e.m.} = \begin{cases} 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ 931,5 \text{ MeV} \end{cases}$
Електрична стала	$\varepsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} / \text{м}$ $1 / 4\pi\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ м} / \text{Ф}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{м}$ $\mu_0 / 4\pi = 10^{-7} \text{ Гн} / \text{м}$

**Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з дисципліни та система оцінки успішності студента**

**ПОЛОЖЕННЯ**

**ПРО РЕЙТИНГОВУ СИСТЕМУ ОЦІНКИ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ  
З КРЕДИТНОГО МОДУЛЯ**

з кредитного модуля \_\_\_\_\_ П-06 „Ядерна та нейтронна фізика”  
(код та назва)  
 для студентів спеціальності (напряму) \_\_\_\_\_ І “Атомна енергетика”  
(код)  
 спеціалізації \_\_\_\_\_ „ Атомні електричні станції ”  
(назва)  
 факультету \_\_\_\_\_ теплоенергетичного  
(назва)

Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з дисципліни згідно з  
робочим навчальним планом:

<i>Семестр/ код кредитного модуля</i>	<i>Навчальний час</i>		<i>Розподіл годин</i>				<i>Контрольні заходи</i>		
	<i>кредити</i>	<i>академічні годин</i>	<i>Лекції</i>	<i>практичні заняття</i>	<i>лібораторні роботи</i>	<i>СРС</i>	<i>МКР</i>	<i>див. індивідуального завдання</i>	<i>Семестрова атестація</i>
5/П-06	6	180	36	18	18	108	-	ДКР	екзамен

Система оцінки успішності за видами занять і завдань з кредитного модуля згідно з робочою навчальною програмою:

	кількість	бали		сума балів
Практичні заняття+СРС	9	робота на занятті	1x9=9	27
		домашні завдання	2x9=18	
Лабораторні роботи	6	виконання та захист	3x6=18	18
ДКР	1			15
<b>Сума вагових балів контрольних заходів</b>				<b>60</b>

Шкала балів за відповідні рівні оцінювання з кожного виду контролю.

- Практичне заняття (з розрахунку 9 занять, на кожне 1 бал за роботу на занятті+2 бали за виконання домашнього завдання):
  - «відмінно», творче розкриття питань, вільне володіння матеріалом – 23...27 балів;
  - «добре», глибоке розкриття питань – 18...23 бали;
  - «задовільно», не достатньо повне розкриття питань, достатня робота на практичному занятті – 10...18 балів.
- Лабораторна робота (з розрахунку виконання 6 лабораторних робіт):
  - за умови гарної роботи (2 бали), правильно оформленого протоколу (1 бал), гарного і своєчасного захисту роботи (3бали) – 6x3=18 балів;
  - за умови невиконання (зниження) показника хоча б з однієї позиції нараховуються штрафні бали (- 1 бал по кожній позиції)
  - «задовільно», не достатньо повне розкриття питань, достатня робота на практичному занятті – 6...5 балів.
- Виконання домашньої контрольної роботи.  
Практичні заняття (максимум – 15 балів):
  - «відмінно», повне виконання роботи у строк – 13-15 балів;
  - «добре», неповне виконання завдання у строк – 10-13 балів;
  - «задовільно», неповністю виконане завдання, з допущенням неточностей та помилок 10-13 балів;
  - «незадовільно», завдання не виконано, або виконано не в строк.

**Заохочувальні і штрафні бали:**

	бали
1. Несвоєчасне виконання завдання СРС	-1
2. Не своєчасне виконання лабораторної роботи	-1
3. Не своєчасний захист лабораторної роботи	-1
4. Відсутність на лекції або на практичних заняттях без поважних причин	-2
5. Ведення конспекту лекцій	1...5
<b>Сума заохочувальних і штрафних балів R<sub>S</sub></b>	<b>10</b>

За результатами навчальної роботи за перші 7 тижнів «ідеальний студент» має набрати 26 балів. На першій атестації (8-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менше 12 балів.

За результатами 13 тижнів навчання «ідеальний студент» має набрати 31 бал. На другій атестації (14-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менше 15.

Максимальна сума балів стартової складової складає 60. Необхідною умовою допуску до екзамену є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, захист лабораторних робіт та стартовий рейтинг не менше 30 балів.

На екзамені студенти виконують екзаменаційну роботу. Кожне завдання містить два теоретичних питання і однієї задачі. Перелік питань наведений у додатку до робочої навчальної програми дисципліни. Кожне теоретичне питання оцінюється по 10 балів, а задача – 20 балів.

Додаткове питання з тем лекційного курсу та практичних занять отримують студенти, які не брали участі у роботі певного практичного заняття. Незадовільна відповідь з додаткового питання знижує загальну оцінку на 4 бали.

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- правильне раціональне рішення, або повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 18-20 (9-10) балів;
- достатньо повна відповідь, правильне рішення (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – 14-17 (7-8) балів;
- неповна відповідь, рішення з помилками (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – 13 (6) балів;
- незадовільна відповідь, або відсутність рішення (менше 60% потрібної інформації та помилки) – менше 12 (5) балів.

Сума стартових балів і балів за екзаменаційну роботу переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з таблицею

$R_D = R_C + R_E$	Оцінка ECTS	Визначення оцінки ECTS	Традиційна оцінка
$95 \leq R_D \leq 100$	A - відмінно	відмінно	відмінно
$85 \leq R_D \leq 94$	B – дуже добре	добре	добре
$75 \leq R_D \leq 84$	C - добре		
$65 \leq R_D \leq 74$	D - задовільно	задовільно	задовільно
$60 \leq R_D \leq 64$	E - достатньо		
$R_D \leq 59$	F <sub>X</sub> - незадовільно	незадовільно	незадовільно
Не зараховано завдання на СРС, або є не зараховані лабораторні роботи, або $R_C \leq 30$	F – незадовільно (потрібна додаткова робота)	не допущено	

Склав доц. Лещенко Б.Ю. \_\_\_\_\_

Ухвалено на засіданні кафедри АЕС і ІТФ

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Завідувач кафедри Туз В.О.

## Література

1. Иванов В. И., Машкович В. И. Центр Э. М. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М., Энергоиздат, 1981, 200 с., ил.
2. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Акад. И.К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.
3. Table of Isotopes CD-ROM
4. Иродов И. Е. Задачи по общей физике: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. Лит., 1988. – 416 с., ил.
5. Ситрус. Робоча навчальна програма з дисципліни «Ядерна та нейтронна фізика»