

**Курта С.А. Будова речовина.
Лекція №2**

**Тема 2. Хвильові властивості матеріальних частинок.
Уявлення про світлові кванти.**

Мета: навести представлення про світлові кванти, історію розвитку представлень про будову атома. Розглянути та вивчити хвильові властивості матеріальних частинок, поняття про дуалістичну природу світла, закон взаємозв'язку маси і енергії, рівняння Ейнштейна. Розглянути питання квантової механіки, вивчити рівняння Шредінгера в часткових похідних, хвильову функцію «пси».

План:

1. Дуалістична природа світла.
2. Закон взаємозв'язку маси і енергії.
3. Ефект Комптона.
4. Хвилі де Бройля.
5. Квантова механіка. Рівняння Шредінгера.

Зміст лекції

1.3. Розділ третій

Хвильові властивості матеріальних частинок.

Сучасна теорія будови атомів і молекул ґрунтується на законах, які описують рух електронів та інших частин, котрі мають дуже малу масу, – рух мікрооб'єктів. Ці закони були сформульовані в 1925-1926 роках. Вони сильно відрізняються від законів, які визначають рух великих тіл – макрооб'єктів.

В основі сучасної теорії лежать уявлення про дуалістичну природу мікрооб'єктів. Вони можуть одночасно проявити себе як частинки і як хвилі, бо мікрооб'єкти володіють одночасно корпускулярними і хвильовими властивостями.

1.3.1. Дуалістична природа світла. В першій половині XIX ст. в результаті вивчення інтерференції і дифракції світла було експериментально доведено, що світло являє собою поперечні електромагнітні коливання.

Проте у XX столітті стала відомою велика кількість інших явищ, котрі свідчать про те, що світло являє собою потік матеріальних частин, світлових квантів чи фотонів. Корпускулярні властивості світла особливо чітко проявляються у двох явищах – у фотоєфекті та ефекті Комптона.

Явище фотоєфекту, відкрите в 1887 р. Герцом, полягає в тому, що метали при дії на них світла випускають електрони. Пояснити фотоєфект, виходячи з хвильової теорії світла, неможливо. Розрахунок показує, що у випадку незначних розмірів електрона кількість енергії така мала, що при сонячному освітленні її необхідно було б багато годин випромінювати для того, щоб електрони накопичили енергію, достатню для виходу із металу. Проте виліт електрона спостерігається тільки після освітлення металу. Крім того, згідно з хвильовою теорією, енергія E_e електронів, яка випускається

металом, повинна бути пропорційна інтенсивності падаючого світла. Було встановлено, що E_e не залежить від інтенсивності світла, а прямо пропорційно залежить від його частоти.

В 1905 р. Ейнштейн показав, що фотоефект пояснюється просто, якщо розглядати світло як потік частин – фотонів. Зіткнувшись з електронами, фотони передають їм свою енергію, яка згідно з рівнянням Планка дорівнює $h\nu$. Отримав пояснення і той факт, що довгохвильове випромінювання не викликає фотоефекту. Енергія фотона у цьому випадку недостатня для виривання електрона із металу.

Максимальною енергією будуть володіти ті із вилітаючих електронів, які не передали одержаної від фотонів енергії атома металу. Очевидно, що енергія $(E_e)_{\max}$ цих електронів рівна різниці енергії фотона $h\nu$ і роботи $-A$, яку необхідно виконати проти сили, яка утримує електрони у металі. Таким чином,

$$(E_e)_{\max} = h\nu - A \quad (1.24)$$

Це рівняння одержало назву *закону Ейнштейна для фотоефекту* і відповідає дослідним даним.

На основі закону Ейнштейна можна знайти величину сталої Планка. Для цього потрібно визначити залежність $(E_e)_{\max}$ від частоти світла. Знайдена експериментальна залежність для цезію зображена на рис. 6.

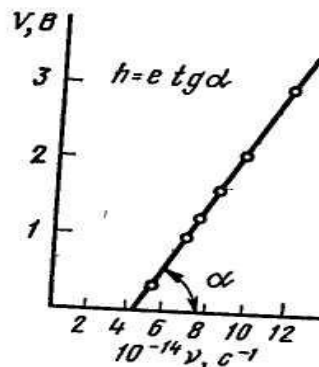


Рис. 6. Залежність напруги від частоти фотопотоку падаючого світла (для цезію).

Перед тим, як перейти до розгляду іншого явища – ефекту Комптона, потрібно описати закон взаємозв'язку маси і енергії.

1.3.2. Закон взаємозв'язку маси і енергії. В 1903 р. Ейнштейн за допомогою розробленої ним теорії відносності довів, що маса тіла, яке рухається, перевищує його масу у стані спокою. При цьому виконується співвідношення:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}, \quad (1.25)$$

де m – маса частинки, що рухається;

m_0 – маса частинки в стані спокою;

v – швидкість руху частинки;

c – швидкість руху світла у вакуумі.

Таким чином, збільшення швидкості руху тіла і, відповідно, збільшення його енергії приводить до збільшення маси.

Ейнштейном було також доведено, що маса тіла зв'язана з його енергією.

$$E = mc^2 \quad (1.26)$$

Це рівняння, яке виражає закон взаємозв'язку маси і енергії, показує співвідношення між цими величинами, які до появи теорії відносності вважалися незалежними один від одного. Рівняння (1.26) встановлює взаємозв'язок між змінами маси (Δm) і енергії (ΔE) в будь-якому процесі. Можна записати: $\Delta E = \Delta mc^2$

Не можна вважати, що цей закон свідчить про можливість перетворення маси в енергію і тим більше матерії в енергію. Маса і енергія – тільки властивості матерії. Маса є мірою її інертності, енергія – мірою руху, тому вони не зводяться одна до одної і не перетворюються одна в одну [1].

Перетворення матерії в рух означало б можливість руху без матерії, що є недопустимим. Рівняння (1.26) показує тільки те, що одна із характеристик тіл, їх маса, залежить від руху.

Рівняння Планка і Ейнштейна дозволяють одержати співвідношення між довжиною хвилі світла і масою фотона.

Фотон не має маси спокою. Це обумовлено тим, що він рухається зі швидкістю світла (при наявності статичної маси у відповідності із співвідношенням (1.26) маса і енергія фотона були б безкінечно великими). Тому вся маса фотона є динамічною, тобто обумовлена рухом і може бути вирахована з енергії фотона за рівнянням (1.26).

З іншого боку, згідно з рівнянням Планка:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (1.27)$$

Із (1.26) і (1.27) одержуємо $mc^2 = hc/\lambda$, звідки

$$\lambda = h/mc \quad (1.28)$$

Дане співвідношення виражає залежність імпульсу фотона mc від довжини хвилі світла. Його можна записати:

$$\lambda = h/p, \quad (1.29)$$

де p – імпульс фотона.

1.3.3. Ефект Комптона. В даному явищі фотони, взаємодіючи з електронами, передають їм частину своєї енергії. У результаті цього збільшується довжина хвилі і змінюється напрямок випромінювання. При цьому відбувається його розсіювання. Цей ефект був відкритий в 1923 р. Комптоном. Він дослідив, що, при опроміненні різних речовин рентгенівськими променями, довжина хвилі розсіяного випромінювання більша від початкової. При цій зміні довжина хвилі $\Delta\lambda$ не залежить від природи речовини і від довжини хвилі початкового випромінювання. Вона визначається величиною кута ϕ між напрямками розсіяного і початкового випромінювання.

Виявилось, що рівняння, яке точно описує ефект Комптона, можна вивести, якщо розглядати взаємодію фотона з електроном речовини як пружне зіткнення двох частин. При цьому виконуються закони збереження енергії та імпульсу.

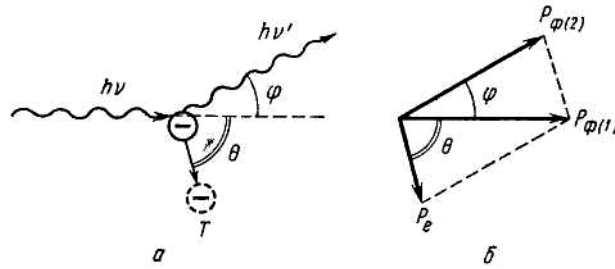


Рис. 7. Пояснення ефекту Комптона:

- а) схема руху фотона і електрона;
 б) векторне додавання імпульсів електрона віддачі і розсіяного фотона.

Нехай, фотон з енергією $h\lambda$ (рис. 7а) стикається з електроном, енергія та імпульс якого дорівнюють нулю. Після зіткнення енергія фотона стає рівною $h\nu'$. Розсіяний фотон рухається під кутом φ до направленою початкового фотона. Електрон віддачі – це електрон, який одержав від фотона невелику кількість енергії. Він рухається під кутом θ до направленою початкового фотона.

Згідно із законом збереження енергії, кінетична енергія електрона віддачі (Т) виражається співвідношенням:

$$T = h\nu - h\nu' = -h(\nu' - \nu) = -h\Delta\nu \quad (1.30)$$

Кінетична енергія частинки рівна $(1/2) mV^2$, де m і V – маса і швидкість частинки, пов'язані з її імпульсом рівнянням:

$$p = mV$$

Отже,

$$T = p^2/2m \quad (1.31)$$

Із рівнянь (1.30) і (1.31) знаходимо рівняння для імпульсу електрона віддачі.

$$p_e^2 = -2m_e h\Delta\nu \quad (1.32)$$

Згідно із законом збереження імпульсу, векторна сума імпульсів розсіяного фотона і електрона віддачі дорівнює імпульсу початкового фотона (рис. 7б). Використовуючи теорему косинусів, одержимо:

$$p_e^2 = p_{\phi(1)}^2 + p_{\phi(2)}^2 - 2p_{\phi(1)} \cdot p_{\phi(2)} \cdot \cos\varphi, \quad (1.33)$$

де $p_{\phi(1)}$ і $p_{\phi(2)}$ – величини імпульсів початкового і розсіяного фотонів. Значення $p_{\phi(1)}$ і $p_{\phi(2)}$ не дуже відрізняються. Тому можна вважати, що:

$$p_{\phi(1)}^2 \approx p_{\phi(2)}^2 \quad (1.34)$$

Тоді рівняння (1.31) має вигляд:

$$p_e^2 = 2p_{\phi(1)}^2 \cdot (1 - \cos\varphi)$$

Оскільки $1 - \cos\varphi = 2\sin^2(\varphi/2)$, то можна записати:

$$p_e^2 = 4p_{\phi(1)}^2 \sin^2(\varphi/2) \quad (1.35)$$

Імпульс фотона згідно з рівнянням (1.30) визначається співвідношенням:

$$p = h/\lambda \quad (1.36)$$

Підставляємо вираз для $p_{\phi(1)}$ у рівняння (1.35) і (1.36). Одержимо:

$$p_e^2 = 4(h^2 / \lambda^2) \sin^2 (\varphi/2) \quad (1.32)$$

Якщо диференціювати співвідношення $v = c/\lambda$, то отримаємо:

$$dv = -(c/\lambda^2) d\lambda \quad (1.33)$$

Оскільки Δv невелике в порівнянні з v , тоді приблизно можна вважати:

$$\Delta v \approx -(c/\lambda^2) \Delta\lambda \quad (1.34)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (1.27) і (1.32), знаходимо:

$$- m_e \Delta v = 2 (h / \lambda^2) \sin^2 (\varphi/2) \quad (1.35)$$

Підставивши рівняння (1.34) у (1.35), одержимо рівняння, що описує ефект Комптона:

$$\Delta\lambda = 2 (h/m_e c) \sin^2 (\varphi/2) \quad (1.36)$$

Як бачимо з рівняння (1.36), величина $h/m_e c$ має розмірність довжини і вона дорівнює 0,0242 А. Часто її називають *комтонівською довжиною хвилі електрона* – це довжина хвилі випромінювання, для якої маса фотона дорівнює масі електрона.

1.3.4. Хвилі де Бройля. Коли фотоефект і ефект Комптона визначено вказують на корпускулярну природу видимого і рентгенівського випромінювання то інтерференція і дифракція свідчать про хвильову природу. Звідси висновок, що рух фотонів характеризується особливими законами, в яких зіставляються корпускулярні і хвильові характеристики.

У 1924 р. де Бройль висловив припущення, що подвійна корпускулярно-хвильова природа притаманна не тільки фотонам, але й будь-яким іншим матеріальним частинкам. Рух будь-якої матеріальної частинки можна розглядати як хвильовий процес. При цьому:

$$\lambda = h/mV, \quad (1.37)$$

де m, V – маса і швидкість частинок. Ці хвилі одержали назву *хвиль де Бройля*.

Пізніше була виявлена *дифракція електронів*. При проходженні пучка електронів через дифракційну решітку на фотопластинці спостерігалась та ж дифракційна картина, що і при проходженні випромінювання з довжиною хвилі, яка дорівнює λ , що вирахована за рівнянням (1.37). У якості дифракційної решітки використовувались кристали металів. Атоми в кристалах розміщені в правильному порядку і утворюють певну дифракційну решітку.

Тепер дифракція електронів широко використовується для вивчення структури речовини. Прилад, за яким спостерігається це явище, називається *електронографом*. Для структурного вивчення використовується також дифракція нейтронів.

Була вивчена дифракція атома гелію, молекули гідрогену .

Якщо за допомогою формули (1.37) обчислити значення λ для різних об'єктів, то впливає, що для макрооб'єктів вони дуже малі. Так для частинки з масою 1 г, що рухається із швидкістю 1 см/с, $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-27}$ см. Це означає, що хвильові властивості макрооб'єктів не ідентифікуються і не проявляються. Якщо довжина хвилі значно менша від розміру атома (10^{-8}), то неможливо скласти дифракційну решітку для їх аналізу. Інше застосування дозволяло б ідентифікувати хвильову природу матеріальної частинки. Так рух електрона з

прискореним потенціалом, що дорівнює 1В ($v = 5,93 \cdot 10^7$), зв'язується з $\lambda = 1,23 \cdot 10^{-7}$ см.

При проходженні потоку електронів (або інших мікрочастин) через дифракційну решітку інтенсивність цього потоку в одному напрямку збільшується, а в інших напрямках зменшується у відповідності з рівнянням де Бройля. Інтенсивність потоку електронів визначає можливість попадання електронів у різні ділянки екрану. Таким чином, можливість перебування мікрочастин у просторі описується закономірностями, аналогічними закономірностям хвильового руху. У цьому проявляється подвійна корпускулярно-хвильова природа мікрочастин і їх корпускулярно-хвильовий дуалізм. Хвилі де Бройля інколи називають хвилями ймовірності.

1.3.5. Квантова механіка. Рівняння Шредінгера. Дослідження де Бройля поклали початок виникненню механіки, яка описує рух мікрочастинок. У 1925-1926 рр. Гейзенберг і Шредінгер незалежно один від одного запропонували два варіанти нової механіки. Метод Шредінгера виявився більш зручним для розрахунків. Сучасна теорія будови атомів і молекул базується на цьому методі. Механіка мікрооб'єктів одержала назву квантової механіки. Механіка, що ґрунтується на законах Ньютона, називається класичною механікою [3].

Закони руху мікрочастин у квантовій механіці виражаються рівнянням Шредінгера. Воно є диференціальним рівнянням. Рівняння Шредінгера для однієї частинки у часткових похідних можна записати:

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + U\psi = E\psi, \quad (1.38)$$

де \hbar – стала Планка;

m – маса частинки;

U – потенціальна енергія;

E – повна енергія; x, y, z – координати.

Рівняння Шредінгера може бути одержане, якщо у диференціальне рівняння хвилі підставимо λ із рівняння де Бройля, а також виразимо імпульс частинки через різницю повної і потенціальної енергій.

Величина ψ називається хвильовою функцією. Її квадрат (ψ^2) має визначений фізичний зміст і характеризує ймовірність перебування частинки у даному місці простору. Величина $\psi^2 dV$ рівна ймовірності знаходження частинки в об'ємі dV . Величину ψ^2 називають *густиною ймовірності* або *електронною густиною*. У відповідності із фізичним змістом хвильової функції вона повинна бути нескінченною, неперервною, однозначною і перетворюватися в нуль там, де частинка не може знаходитись. Квантово-механічне пояснення завдань в теорії будови атома і молекули зводиться до знаходження функції ψ для рівняння Шредінгера, яка володіє властивостями і значенням енергії E . Розв'язання рівняння Шредінгера у більшості випадків становить дуже складне математичне завдання.

У квантовій механіці при розгляді атома і молекули часто користуються спеціальною системою одиниць, застосування якої дозволяє скоротити запис

вихідних рівнянь. У цій системі за одиницю довжини беруть радіус першої борівської орбіти електрона у атомі гідрогену $a_0 = 0,529 \text{ \AA}$, а за одиницю енергії – величину потенціальної енергії електрона на його орбіталі: $E = me^4/h^2 = e^2/a_0 = 27,2 \text{ eV}$. За одиниці електричного заряду і маси беруть заряд і масу електрона. Вказані одиниці були запропоновані англійським ученим Хартрі, і називаються вони *атомними одиницями* (або *одиниці Хартрі*).

Система понять квантової механіки сильно відрізняється від системи понять класичної механіки. Квантова механіка дає *ймовірність* знаходження частинок і нічого не говорить про траєкторію частинки, її координати і швидкості у той чи інший момент часу. Проте тут зберігають своє значення маса, енергія і момент імпульсу частинки (стан електрона).

Одним із основних положень квантової механіки є співвідношення невизначеності, встановлене Гейзенбергом. Згідно з цим співвідношенням неможливо одночасно точно визначити місце знаходження частинки і її імпульс ($p = mv$).

Чим точніше визначається координати частинки, тим більш невизначеним буде її імпульс. Навпаки, чим точніше відомий імпульс, тим більш невизначена координата. Відношення невизначеностей має вигляд:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar \quad (1.39)$$

або

$$\Delta x \Delta v_x \geq \hbar/m, \quad (1.40)$$

де Δx – невизначеність в положенні частинки;

Δp_x і Δv_x – невизначеності у величинах, які складають імпульс та швидкість у напрямі координати x .

Аналогічні співвідношення записуються і для координат y, z .

Співвідношення невизначеностей робить зрозумілими багато особливостей мікросвіту.

Будемо вважати, що рух електрона проходить в області радіуса r . Тоді невизначеність в його положенні можна вважати рівною r . Так, за співвідношенням (1.39) мінімальна невизначеність Δp в значенні імпульсу електрона p рівна \hbar/r . Відомо, що величина імпульсу не може бути менш невизначеною у його значенні. Тому мінімально можливе значення імпульсу буде:

$$p = \hbar/r \quad (1.41)$$

Енергія електрона складається з його кінетичної енергії, рівної $p^2/2m_e$ за рівнянням (1.26) і потенціальної енергії. Вона на відстані r від ядра рівна e^2/r . Звідси, враховуючи значення (1.41), одержимо рівняння для повної енергії (E) електрона у атомі гідрогену:

$$E = (\hbar^2/2 m_e r^2) - (e^2/r) \quad (1.42)$$

Знайдена залежність енергії електрона від радіусу його області обертання зображена на рис. 8.

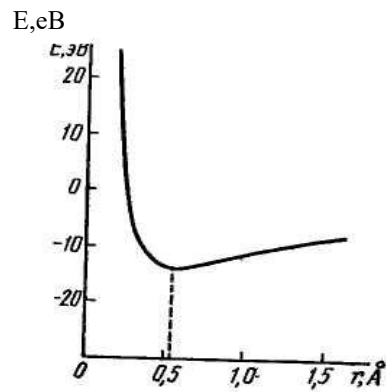


Рис. 8. Залежність енергії електрона від радіуса області обертання.

Як бачимо, крива має мінімум. Величину r_0 , при якій енергія мінімальна, легко знайти, оскільки у точці мінімуму $dE/dr = 0$.

Продиференціювавши, одержимо: $-(\hbar^2/m_e r_0) + e^2 = 0$,
звідси

$$r_0 = \hbar^2 / m_e e^2 \quad (1.43)$$

Підставивши це значення r_0 в рівняння (1.42), знайдемо вираз для мінімальної енергії електрона в атомі гідрогену:

$$E_{\min} = - (1/2) (m_e e^4 / \hbar^2) \quad (1.44)$$

Отриманий результат має глибокий зміст.

Згідно з класичною механікою електрон буде мати мінімальну енергію, коли він впаде на ядро. Проте квантова механіка показує, що енергія мінімальна, коли він рухається по границях сфери з радіусом r_0 . При цьому його точне положення у середині даної сфери принципово не може бути вказано. При $r < r_0$ енергія електрона зростає.

Порівнявши рівняння (1.43) і (1.12), переконуємось, що величина r_0 рівна радіусу першої борівської орбіти. При співставленні рівнянь (1.44) і (1.16) бачимо, що значення E_{\min} , знайдене за допомогою співвідношення невизначеностей, співпадає з мінімальним значенням енергії електрона в атомі гідрогену.

Висновки

1. Мікрооб'єкти можуть одночасно проявити себе як частинки і як хвилі, оскільки володіють одночасно корпускулярними і хвильовими властивостями.
2. Світло являє собою потік матеріальних частин, світлових квантів, - фотонів. Корпускулярні властивості світла особливо чітко проявляються у двох явищах – у фотоефекті та ефекті Комптона.
3. Фотоефект описується законом Ейнштейна. Ейнштейном було також доведено, що маса тіла зв'язана з його енергією. Це виражається рівнянням, яке показує співвідношення між цими величинами, що до появи теорії відносності вважалися незалежними один від одного. Але маса і енергія – тільки властивості матерії, вони не перетворюються одна в одну. На основі закону Ейнштейна можна знайти величину сталої Планка.

4. Фотони, взаємодіючи з електронами, передають їм частину своєї енергії. У результаті цього збільшується довжина хвилі і змінюється напрямок випромінювання, відбувається його розсіювання. Довжина хвилі розсіяного рентгенівського випромінювання більша від початкової. При цій зміні довжина хвилі не залежить від природи речовини і від довжини хвилі початкового випромінювання, а визначається величиною кута між напрямками розсіяного і початкового випромінювання. Це явище називається ефектом Комптона.
5. Рух фотонів характеризується особливими законами, в яких зіставляються корпускулярні і хвильові характеристики. Де Бройль висловив припущення, що подвійна корпускулярно-хвильова природа притаманна не тільки фотонам, але й будь-яким іншим матеріальним частинкам. Рух будь-якої матеріальної частинки можна розглядати як хвильовий процес. Такі хвилі одержали назву хвиль де Бройля.
6. Можливість перебування мікрочастинок у просторі описується закономірностями, аналогічними закономірностям хвильового руху. У цьому проявляється подвійна корпускулярно-хвильова природа мікрочастинок і їх корпускулярно-хвильовий дуалізм. Хвилі де Бройля інколи називають хвилями ймовірності.
7. Система понять квантової механіки сильно відрізняється від системи понять класичної механіки. Квантова механіка дає ймовірність знаходження частинок і нічого не говорить про траєкторію частинки, її координати і швидкості у той чи інший момент часу. Проте тут зберігають своє значення маса, енергія і момент імпульсу частинки (стан електрона).
8. Закони руху мікрочастинок у квантовій механіці виражаються диференціальним рівнянням Шредінгера. У відповідності із фізичним змістом хвильової функції вона повинна бути нескінченною, неперервною, однозначною і перетворюватися в нуль там, де частинка не може знаходитись.
9. Згідно зі співвідношенням Гейзенберга неможливо одночасно точно визначити місце знаходження частинки і її імпульс. Чим точніше визначається координати частинки, тим більш невизначеним буде її імпульс і навпаки.

Рекомендована література

Основна

1. Курта С.А. Будова речовини, навчально-методичний посібник, ВДВ ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника м.Івано-Франківськ-Калуш,.2007 р.,162 с. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.. № 25395,від 20.08.2008р. Міністерство освіти і науки України, державний департамент інтелектуальної власності.
2. Курта С.А.,Лучкевич Є.Р., Матківський М.П. Хімія органічних сполук. Підручник для вищих навчальних закладів. м. Івано-Франківськ: Прикарпат.нац.ун-т ім. В.Стефаника, 2013. – 599 с. вид-во. Прикарпат. нац. у-ту. Авторські права захищені свідоцтвом про реєстрацію авторського

права на твір № 52578 від 13.12.2013 р. державним департаментом інтелектуальної власності МОН України.

3. Курта С.А. Хімія і технологія хлорорганічних сполук. Монографія. Видавництво “Плай” ЦІТ ПНУ, опуб. 12.03.2009 р., -262 с. тираж 300 шт., 76000, м. Івано-Франківськ, вул. С. Бандери 1, свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір в Україні № 30576 від 08.10.2009 р.
4. Курта С.А., Курганський В.С. Хімія та технологія високомолекулярних речовин, навчально-методичний посібник, м.Івано-Франківськ, ВДВ ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2006 р., -132 с. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. № 25394 від 20.08.2008р. Міністерство освіти і науки України, державний департамент інтелектуальної власності.
5. Алесковский В.М. Хімія твердого тіла. М. 1987.-205с. “Химия”, 1982

Допоміжна

6. М.Х.Карапетьянц, С.Н.Дракин. Строения вещества. Учб. Пос. Для вузов.3-т из.. М. Высшая школа, 1978.-304с.
7. Інструкції до лабораторних робіт з курсу органічної хімії. Кафедра хімії ПНУ. 2016 р. 58с.

Завдання для самоконтролю

Питання 1. Хвильові властивості матеріальних частинок.

Питання 2. Дуалістична природа світла.

Питання 3. Закон взаємозв'язку маси і енергії за Енштейном. Рівняння Енштейна для фотоефекту.

Питання 4. Ефект Комптона.

Питання 5. Хвилі де Бройля.

Питання 6. Квантова механіка, рівняння Шредінгера.

Питання 7. Відношення невизначеності Гейзенберга.