

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.ліфшиця

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан факультету (директор
навчально-наукового інституту)

фізичний факультет

(вказати назву структурного підрозділу)

ВОВК Руслан Володимирович

(вказати П.І.Б керівника)

“30” 08 2024р.



Робоча програма навчальної дисципліни

Спеціальний практикум «Квантова теорія конденсованого стану»

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти бакалавр

галузь знань 10 Природничі науки

(шифр і назва)

спеціальність 104 – Фізика та астрономія

(шифр і назва)

освітня програма “Фізика”

(шифр і назва)

спеціалізація _____

(шифр і назва)

вид дисципліни за вибором

(обов'язкова / за вибором)

факультет фізичний

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 30 ” 08 2024 року, протокол № 9

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Рашба Георгій Ілліч, канд. фіз.-мат. наук, доц., завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М. Ліфшиця;

Гриб Олександр Миколайович, доктор фіз.-мат. наук;

Єзерська Олена Володимирівна, канд. фіз.-мат. наук, доц.

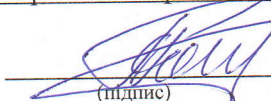
Програму схвалено на засіданні кафедри

теоретичної фізики імені академіка. М. Ліфшиця

Програму схвалено на засіданні кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

Протокол від “ 27 ” 08 2024 року № 12

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця


(підпис)

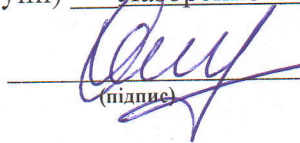
Рашба Г.І.
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньої програми

фізика (спеціальність 104 – фізика та астрономія)

назва освітньої програми

Гарант освітньої (професійної/наукової) програми
(керівник проектної групи) Лазоренко О.В.


(підпис)

Лазоренко О.В.
(прізвище та ініціали)

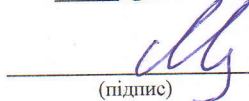
Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 28 ” 08 2024 року № 1

Голова методичної комісії фізичного факультету


(підпис)

Макаровський М.О..
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни спеціальний практикум «Квантова теорія конденсованого стану» складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки першого рівню вищої освіти – бакалавр спеціальності (напряму) 104 – фізика та астрономія спеціалізації

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни – спеціального практикуму «Квантова теорія конденсованого стану» є:

формування уявлень студентів про квантові явища у кристалічних ґратках та особливості динаміки неідеальних кристалів з дефектами;

ознайомлення студентів зі сучасними методами квантової теорії поля у квантовій статистиці та подальші розрахунки термодинамічних величин конденсованих систем.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни спеціального практикуму «Квантова теорія конденсованого стану» є навчити студентів:

- основам квантової механіки кристалічної решітки;
- квазічастинковому підходу для опису в термінах фононів квантовомеханічних властивостей і термодинаміки кристалів;
- розрахунку процесів непружного розсіювання нейтронів кристалами та відновлення законів дисперсії їхніх коливань;
- досліджувати процеси локалізації коливань у кристалах з дефектами і розраховувати частоти таких коливань;
- досліджувати одноелектронні енергетичні спектри в періодичних потенціалах точними і наближеними методами на основі зонної теорії;
- досліджувати властивості електронів провідності в постійних та високочастотних електромагнітних полях;
- користуючись навчальною та довідковою літературою, обирати адекватні методи розв'язку задач квантової механіки кристалів та теорії дефектів в кристалах;
- основним поняттям квантової механіки, необхідним для подальшого викладання цього курсу;
- володіти технікою вторинного квантування бозонів та ферміонів, вміти використовувати цей формалізм з метою опису електронів провідності у провідниках при наявності магнітного поля та без нього.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

• Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми з фізики та/або астрономії у професійній діяльності або у процесі подальшого навчання, що передбачає застосування певних теорій і методів фізики та/або астрономії і характеризується складністю та невизначеністю умов (ІК).

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК-1).
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК-2).
- Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК-3).
- Здатність бути критичним і самокритичним (ЗК-4).
- Здатність приймати обґрунтовані рішення (ЗК-5).
- Навички міжособистісної взаємодії (ЗК-6).
- Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт (ЗК-8).
- Визначеність і наполегливість щодо поставлених завдань і взятих обов'язків (ЗК-9).
- Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово (ЗК-12).
- Здатність спілкуватися іноземною мовою (ЗК-13).
- Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії (ФК-1).

- Здатність працювати із науковим обладнанням та вимірними приладами, обробляти та аналізувати результати досліджень (ФК-4).
- Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних та астрономічних задач і моделювання фізичних систем (ФК-5).
- Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси (ФК-6).
- Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту (ФК-7).
- Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації (ФК-9).
- Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей (ФК-10).
- Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень (ФК-12).
- Орієнтація на найвищі наукові стандарти - обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук. (ФК-13).
- Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту (ФК-14).

1.3. Кількість кредитів – 5.

1.4. Загальна кількість годин – 150.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
За вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
4-й	-й
Семестр	
8-й	-й
Лекції	
Не передбачені навчальним планом	год.
Практичні, семінарські заняття	
Не передбачені навчальним планом	год.
Лабораторні заняття	
72 год.	год.
Самостійна робота	
78 год.	год.
Індивідуальні завдання	
Не передбачені навчальним планом	
Залік	

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

знати: принципи і методи фізики твердого тіла, методи дослідження квантових моделей кристалів та основні підходи в теорії дефектів, методи сучасної квантової статистики.

вміти: застосовувати методи фізики твердого тіла для дослідження термодинамічних та кінетичних характеристик твердих тіл, досліджувати квантовомеханічні ефекти в кристалічних ґратках та спектри локальних мод у неідеальних

кристалах, застосовувати формалізм вторинного квантування та континуального інтегрування у процесі дослідження макроскопічних систем.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії (ПРН-1).
- Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них (ПРН-2).
- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій (ПРН-3).
- Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії (ПРН-5).
- Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії (ПРН-6).
- Розуміти, аналізувати і пояснювати нові наукові результати, одержані у ході проведення фізичних та астрономічних досліджень відповідно до спеціалізації (ПРН-7).
- Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань (ПРН-8).
- Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки (ПРН-11).
- Розуміти зв'язок фізики та/або астрономії з іншими природничими та інженерними науками, бути обізнаним з окремими (відповідно до спеціалізації) основними поняттями прикладної фізики, матеріалознавства, інженерії, хімії, біології тощо, а також з окремими об'єктами (технологічними процесами) та природними явищами, що є предметом дослідження інших наук і, водночас, можуть бути предметами фізичних або астрономічних досліджень (ПРН-13).
- Знати і розуміти роль і місце фізики, астрономії та інших природничих наук у загальній системі знань про природу та суспільство, у розвитку техніки й технологій та у формуванні сучасного наукового світогляду (ПРН-17).
- Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства (ПРН-22).
- Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії (ПРН-23).
- Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій (ПРН-24).
- Мати навички самостійного прийняття рішень стосовно своїх освітньої траєкторії та професійного розвитку (ПРН-25).

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Цикл лабораторних робіт 1. Квантова механіка кристала

Тема 1. Квантування малих коливань кристала.

Тема 2. Представлення чисел заповнення.

Тема 3. Основний стан кристала. Фонони.

Тема 4. Квантові кристали.

Тема 5. Анггармонізм коливань кристала і взаємодія фононів.

Тема 6. Ефективний гамільтоніан взаємодії фононів і процеси розпаду.

Тема 7. Квантово-механічне визначення функцій Гріна.

Тема 8. Парний коррелятор зсувів.

Тема 9. Середній квадрат зміщення атома.

Тема 10. Непружна дифракція на кристалі.

Тема 11. Відновлення закону дисперсії коливань.

Тема 12. Квазікласичне квантування самолокалізованих коливань в анггармонічному ланцюжку атомів.

Тема 13. Зв'язаний стан фононів в анггармонічному ланцюжку атомів.

Цикл лабораторних робіт 2. Дефекти кристалічної решітки

Тема 14. Моделі точкових дефектів кристалічної решітки.

Тема 15. Локалізація коливань поблизу ізольованого ізотоп-дефекту.

Тема 16. Функція Гріна для кристала з точковими дефектами.

Тема 17. Локальні коливання при наявності двовірного (плоского) дефекту.

Тема 18. Дислокації і дисклінації.

Цикл лабораторних робіт 3. Методи дослідження сильно корельованих електронних систем

Тема 19. Магнетизм як квантове явище. Теорема Бора-Ван-Льовен. Наближення молекулярного поля. Рівняння Вейсса. Еквівалентність теорії молекулярного поля і моделі з нескінченним радіусом взаємодії на прикладі моделі Ізінга із нескінченним радіусом взаємодії..

Тема 20. Одновимірна модель Ізінга із взаємодією найближчих сусідів. Метод трансфер-матриці. Термодинаміка одновимірної моделі Ізінга. Розрахунки статистичної суми для скінченного замкнутого ланцюжка, лінійної моделі. Дослідження квантового фазового переходу по полю для антиферомагнітного нескінченного ланцюжка.

Тема 21. Модель Гейзенберга. Основний стан гейзенбергівського феромагнетика. Спінова хвиля. Спектр низькоенергетичних станів гейзенбергівського феромагнетика. Зв'язані стани магнонів.

Тема 22. Наближені методи дослідження енергетичного спектру та термодинаміки моделі Гейзенберга. Лінійне наближення спінових хвиль в методі Голстейна–Прімакова. Низькотемпературна термодинаміка гейзенбергівського феромагнетика.

Тема 23. Релятивістські взаємодії. Магнітна анізотропія. Спінові хвилі з урахуванням релятивістських взаємодій. Намагніченість феромагнетика при $T = 0$.

Тема 24. Точно розв'язувана одновимірна ХУ-модель зі спіном $1/2$. Термодинаміка ХУ-моделі. Фазовий перехід по полю в ХХ-моделі при $T = 0$.

Тема 25. Рівняння руху спіну в магнітному полі. Прецесія. Лінеаризація рівнянь руху. Напівкласична теорія спінових хвиль в феромагнетиках.

Тема 26. Напівкласична теорія спінових хвиль в антиферомагнетиках. Випадок лінійного ланцюжка.

Цикл лабораторних робіт 4. Методи квантової статистики

Тема 27. Формалізм Дірака у квантовій механіці.

Тема 28. Оператор еволюції.

Тема 29. Представлення Шредінгера, Гейзенберга і Дірака.

Тема 30. Матриця розсіяння.

- Тема 31. Континуальні інтеграли.
 Тема 32. Амплітуда переходу осцилятора.
 Тема 33. Заряд у магнітному полі.
 Тема 34. Квазікласичне наближення.
 Тема 35. Функція Гріна для одночастинкового рівняння Шредінгера.
 Тема 36. Хвильові функції бозонів та ферміонів у представленні вторинного квантування.
 Тема 37. Квантовомеханічні величини та оператори в представленні вторинного квантування.. Гільбертів простір хвильових функцій.
 Тема 38. Оператори знищення та породження ферміонів та бозонів.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		л	п	лаб	Інд	с.р
1	2	3	4	5	6	7
Цикл лабораторних робіт 1. Квантова механіка кристалла						
Тема 1	3			1		2
Тема 2	3			1		2
Тема 3	3,5			1,5		2
Тема 4	3,5			1,5		2
Тема 5	3,5			1,5		2
Тема 6	3,5			1,5		2
Тема 7	3			1		2
Тема 8	3			1		2
Тема 9	3			1		2
Тема 10	4			2		2
Тема 11	4			2		2
Тема 12	5			2		3
Тема 13	5			2		3
Разом за розділом 1	47			19		28
Цикл лабораторних робіт 2. Дефекти кристалічної решітки						
Тема 14	4			2		2
Тема 15	4			2		2
Тема 16	4			2		2
Тема 17	4			2		2
Тема 18	6			2		4
Разом за розділом 2	22			10		12
Цикл лабораторних робіт 3. Методи дослідження сильно корельованих електронних систем						
Тема 19	3			2		1
Тема 20	3			2		1
Тема 21	3			2		1
Тема 22	3			2		1
Тема 23	3			2		1
Тема 24	3			2		1
Тема 25	6			2		4

Тема 26	6			2		4
Разом за розділом 3	30			16		14
Цикл лабораторних робіт 4. Методи квантової статистики						
Тема 27	4,5			2,5		2
Тема 28	4,5			2,5		2
Тема 29	4,5			2,5		2
Тема 30	4,5			2,5		2
Тема 31	3,5			1,5		2
Тема 32	3,5			1,5		2
Тема 33	5			3		2
Тема 34	4			2		2
Тема 35	5			3		2
Тема 36	4			2		2
Тема 37	4			2		2
Тема 38	4			2		2
Разом за розділом 4	51			27		24
Усього годин	150			72		78
Залік						

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

Див. тематичний план. Назви лабораторних робіт є назвами відповідних тем. Студенти під керівництвом викладача проводять аналітичні та чисельні розрахунки.

5. Самостійна робота

Пояснення щодо того, що повинен зробити студент під час самостійної роботи.

1. По всіх нижче вказаних темах опрацювати результати, отримані під час аудиторних занять, прочитати відповідні параграфи в підручниках [1–22].
2. Самостійно підготуватися до участі лабораторних робіт.
3. Після викладу кожного розділу цієї навчальної дисципліни в рамках самостійної роботи студентам пропонуються домашні завдання. Вони покликані стимулювати більш глибоке вивчення та закріплення матеріалу навчальної дисципліни студентами.

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Знайти власні функції та власні значення гамільтоніану ланцюга атомів, які взаємодіють з ближчими сусідами за допомогою пружних сил.	2
2	Вияснити, чим відрізняються закони дисперсії для частот коливань дискретного ланцюга атомів та для частот коливань струни.	2
3	Вивести вирази для одностинкових і двочастинкових операторів в представлення чисел заповнення.	2
4	Вивести вирази для операторів породження і знищення фононів.	2
5	Вияснити зв'язок між переходами між рівнями енергії осцилятора і операторами знищення і породження фононів.	2
6	Вивести вираз для квантовомеханічної функції Гріна.	2

7	Навести приклади процесів розсіювання фононів.	2
8	Визначити, в яких процесах проявляється взаємодія фононів.	2
9	Вияснити переваги розрахунків з застосуванням ефективного гамільтоніану взаємодії фононів.	2
10	Навести приклади квантових кристалів і розрахувати амплітуди коливань атомів в них.	2
11	Розрахувати умови квазікласичного квантування самолокалізованих коливань у ангармонічному ланцюжку атомів.	2
12	Зв'язаний стан фононів у ангармонічному ланцюжку атомів.	3
13.	Навести класифікацію точкових дефектів кристалічної решітки.	3
14	Розрахувати частоти локалізованих коливань поблизу ізольованого ізотоп-дефекту.	2
15	Розробити модель поля зміщень поблизу ізотоп-дефекту.	2
16	Отримати енергетичний спектр кристалу с точковими дефектами з застосуванням функції Гріна.	2
17	Розрахувати локальні коливання при наявності двовимірного дефекту.	2
18	Навести приклади дисклінацій в кристалічній ґратці.	4
19	Провести чисельний розв'язок рівняння Вейса. Самостійно промодельовати фазовий перехід 2-го роду по температурі в рамках моделі Вейса при $H=0$. Дослідити поведінку $M(H,T)$ – намагніченості при наявності магнітного поля.	1
20	Розрахувати аналітично статистичну суму, вільну енергію, намагніченість, магнітну сприйнятливість, теплоємність нескінченного ланцюжка в моделі Ізінга зі спіном $1/2$.	1
21	Дослідити зв'язані стани двох магнонів для замкненого ланцюжка в моделі Гейзенберга.	1
22	Знайти спектр магнонів в лінійному наближенні спінових хвиль для моделі Гейзенберга з одновісною анізотропією. Вивести формулу для теплоємності в лінійному наближенні спінових хвиль для ізотропної моделі Гейзенберга	1
23	Отримати діагоналізований гамільтоніан в моделі Гейзенберга в лінійному наближенні спінових хвиль з урахуванням релятивістських взаємодій за допомогою U-V- перетворення Боголюбова	1
24	Вивести формулу для теплоємності для XX моделі, чисельно промодельовати її температурну та польову залежності.	1
25	Провести лінеаризацію рівнянь руху для ізотропної моделі Гейзенберга	4
26	Дослідити напівкласичний спектр антиферромагнітного ланцюжка в моделі Гейзенберга	4
27	Розрахунок узагальненої нерівності Шварца.	2
28	Розрахунок узагальненої рівності Парсеваля.	2
29	Розрахунки власних значень та власних функцій оператора проектування.	2
30	Дослідження руху квантового осцилятора у представленні Гейзенберга.	2
31	Отримання хвильової функції електрона у магнітному полі в імпульсному представленні.	2

32	Розрахунок запізнювальної функції Гріна електрона та її часової фур'є-компоненти у магнітному полі.	2
33	Розрахунок функції Гріна електрона у схрещених електричному та магнітному полях.	2
34	Дослідження енергії основного стану неідеального бозе-газу.	2
35	Використання операторів густин маси, імпульсу, енергії, кутового моменту системи частинок.	2
36	Порівняльний аналіз компоненти Фур'є кулонівської взаємодії електронів у тривимірному, двовимірному та одновимірному випадках.	2
37	Розрахунок матричних елементів плоскої хвилі у базисі станів Ландау.	2
38	Дослідження гамільтоніану взаємодії електронів з коливаннями кристалової ґратки, яка містить ізотопичні домішкові атоми з урахуванням магнітного квантування руху електронів.	2
	Разом	78

6. Індивідуальні завдання

Не передбачені навчальним планом.

7. Методи контролю

Поточне опитування, виконання та захист лабораторних робіт, залік.

8. Схема нарахування балів

Поточний контроль та самостійна робота				Письмовий залік	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 3	Розділ 4		
T1-T13	T14-T18	T19-T26	T27-T38		
15	15	15	15	40	100

Для зарахування заліку студент повинен здати чотири цикли лабораторних робіт, виконати домашні завдання і набрати не менше 7,5 балів за кожний з розділів. Для допуску до письмового заліку треба отримати за підсумками поточного контролю не менше 30 балів. За письмовий залік треба отримати не менше 20 балів та в підсумку не менше 50 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Рекомендована література

Основна література

1. Косевич А.М. Механіка кристалічної ґратки Харків: "Акта", ISBN 966-7021-97-1, 305 с., 2006.
2. Kosevich A.M. The Crystal Lattice. Phonons, Solitons, Dislocations, Superlattices Wiley, New York, ISBN: 978-3-527-40508-4, 356 p., 2005.
3. Ziman J. Principles of the theory of solids. Cambridge University Press, 1972.
4. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. John Wiley & Sons, Inc, 2004.
5. Kittel C. Quantum theory of solids. New York-London: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
6. Landau L.D. Quantum Mechanics. Non-Relativistic Theory. Course of Theoretical Physics. V.3 / L.D.Landau, E.M.Lifshitz. Pergamon Press, 1991. – 674 p.
7. Abrikosov A. Fundamentals of the Theory of Metals / A. A. Abrikosov // Mineola, New York: Courier Dover Publications Inc.- 2017.- 640 P.
8. L.D.Landau, E.M.Lifshitz, Course of Theoretical Physics: Statistical Physics, Part.1 [Volume 5], Pergamon Press, 1969.
9. E.M.Lifshitz, L.P.Pitaevskii, Course of Theoretical Physics: Physical Kinetics [Volume 10], Pergamon Press, 1981.
10. Єрмолаєв О.М., Рашба Г.І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки. – Х. : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2004. – 516 с.

Допоміжна література

1. Kadanoff L.P., Baum G. Quantum Statistical Mechanics. Green's Function Methods in Equilibrium and Nonequilibrium Problems. – W.A.Benjamin, Inc., New York, 1962. – 203 p.
 2. Abrikosov A. Quantum Field Theoretical Methods in Statistical Physics / A. A. Abrikosov, L. P. Gorkov and I. Y. Dzyaloshinskii // Oxford: Pergamon Press.- 1965.- 388 P.
 3. Negele J.W. and Orland H. Quantum Many-Particle Systems. – California: Addison-Wesley Publ. Co., 1988. – 456 p.
- 10. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**

Сайт кафедри теоретичної фізики:

http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_study_ukr.html

http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_ref_ukr.html

http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/presentations/chemical_bonds.pdf