

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра інформаційних технологій та комп'ютерної фізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор навчально-наукового інституту
фізико-технічних та комп'ютерних наук

Олег АНГЕЛЬСЬКИЙ
09 серпня 2024 року



РОБОЧА ПРОГРАМА
навчальної дисципліни

МЕТОД ВТОРИННОГО КВАНТУВАННЯ ТА МЕТОД ФУНКЦІЙ ГРІНА
вибіркова

Освітньо-професійна програма «Фізика та астрономія»

Спеціальність 104 Фізика та астрономія

Галузь знань 10 Природничі науки

Рівень вищої освіти перший бакалаврський

Мова навчання українська

Робоча програма навчальної дисципліни «МЕТОД ВТОРИННОГО КВАНТУВАННЯ ТА МЕТОД ФУНКЦІЙ ГРІНА» складена відповідно до освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти «Фізика та астрономія за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія галузі знань 10 - Природничі науки, затвердженої Вченою радою Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (Протокол № 7 від «30» червня 2021 року).

Розробник: Войцехівська Оксана Миколаївна, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики, кандидат фіз.-мат. наук, доцент.

Викладач: Войцехівська Оксана Миколаївна, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики, кандидат фіз.-мат. наук, доцент.

Погоджено з гарантом ОПП і затверджено на засіданні кафедри
інформаційних технологій та комп'ютерної фізики

Протокол № 1 від “08” серпня 2024 року

Завідувачка кафедри ІТКФ  Борча М.Д.

Схвалено методичною радою навчально-наукового інституту
фізико-технічних та комп'ютерних наук

Протокол № 1 від “09” серпня 2024 року

Голова методичної ради ННІФТКН  Козярський І.П.

Пояснювальна записка

Метою навчальної дисципліни "Метод вторинного квантування та функцій Гріна" є ознайомлення студентів з основними методами квантової теорії поля та способами їх використання для вивчення основних проблем сучасної теоретичної та експериментальної фізики, наданні інформації про принципи опису поведінки квантових частинок і систем та їх взаємодії між собою, а також з квантованими полями, про прикладний аспект їх використання для різних задач теоретичної фізики. Програма відображає також зміст курсу "Метод вторинного квантування та функцій Гріна" як основу наступної навчальної та науково-дослідницької роботи студента..

Завданням вивчення навчальної дисципліни "Метод вторинного квантування та функцій Гріна" є оволодіння майбутніми фахівцями математичним апаратом методів квантової теорії поля для розв'язування задач багатьох частинок.

Пререквізити: курси вищої математики: "Математичний аналіз", "Аналітична геометрія та лінійна алгебра", "Диференціальні та інтегральні рівняння", "Основи векторного і тензорного аналізу", "Методи математичної фізики", "Електродинаміка", "Квантова механіка".

Постреквізити: спеціалізовані курси вибіркової компоненти .

Результати навчання:

знати: загальний математичний апарат методу вторинного квантування та функцій Гріна; способи їх використання для розв'язування задач багатьох частинок; мати чіткі уявлення про фізичну природу явищ, які відбуваються у системах багатьох частинок.

вміти: ефективно застосовувати ці методи для розв'язування конкретних задач; аналізувати результати фізичних експериментів; відтворювати математичні моделі фізичних явищ, використовуючи при цьому необхідний математичний апарат; пояснити суть явищ і процесів у твердих тілах з точки зору квантової теорії; інтерпретувати квантові процеси у системах багатьох частинок.

Програмні результати навчання:

ПР1. Знати, розуміти та вміти застосовувати 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 і класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та астрономії.

ПР4. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, диференціальної геометрії, математичного моделювання.

ПР8. 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.

ПР9. Мати базові навички проведення теоретичних та/або експериментальних наукових досліджень з окремих спеціальних розділів фізики або астрономії, що виконуються індивідуально (автономно) та/або у складі наукової групи.

ПР13. Розуміти зв'язок фізики та 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.

ПР22. Розуміти значення фізичних досліджень для забезпечення сталого розвитку суспільства.

ПР23. Розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії.

ПР24. Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій.

Фахові компетентності.

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

ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ФК1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК2. Здатність використовувати на практиці базові знання з математики як математичного апарату фізики і астрономії при вивченні та дослідженні фізичних та астрономічних явищ і процесів.

ФК7. Здатність використовувати базові знання з фізики та астрономії для розуміння будови та поведінки природних і штучних об'єктів, законів існування та еволюції Всесвіту.

ФК9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК10. Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.

ФК13. Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.

ФК14. Здатність здобувати додаткові компетентності через вибіркові складові освітньої програми, самоосвіту, неформальну та інформальну освіту.

Опис змісту робочої програми навчальної дисципліни
Загальна інформація

Метод вторинного квантування та функцій Гріна												
Форма навчання	Рік підготовки	Семестр	Кількість			Кількість годин						Вид підсумкового контролю
			кредитів	годин	змістових модулів	лекції	практичні	семінарські	лабораторні	самостійна робота	індивідуальні завдання	
Денна (повна та скорочена форма)	4	8	4,5	135	2	48		12		75		залік

Структура змісту навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
		л	п	сем.	інд.	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Змістовий модуль 1. Метод вторинного квантування у фізиці твердого тіла						
Тема 1. Метод вторинного квантування, як основа вивчення властивостей твердих тіл.		2				5

Тема 2. Хвильові функції систем багатьох частинок.		4		1		7
Тема 3 Оператори вторинного квантування. Комутаційні співвідношення для бозе-та фермі операторів народження а знищення.		4		1		7
Тема 4. Оператори поля - квантовані хвильові функції. Комутаційні співвідношення для операторів поля.		4		1		7
Тема 5. Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні вторинного квантування.		4		1		7
Тема 6. Гамільтоніан Фреліха для опису взаємодіючих квазічастинок.		4		1		7
Тема 7. Елементи теорії низькотемпературної надпровідності.		6		4		10
Разом за ЗМ1		28		9		50
Змістовий модуль 2. Метод функцій Гріна у фізиці твердого тіла						
Тема 8. Класична функція Гріна для одночастинкового рівняння Шредінгера.		2				5
Тема 9. Рівняння Дайсона.		2				5
Тема 10. Різні типи функцій Гріна та їх зв'язок з кореляційними функціями.		2		1		5
Тема 11. Реакція системи на зовнішнє збурення.		2		1		5
Тема 12. Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні функцій Гріна .		2		1		5
Разом за ЗМ 2		10		3		25
Усього годин	120	48		12		75

Теми лекційних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Метод вторинного квантування, як основа вивчення властивостей твердих тіл.	2
2	Хвильові функції систем багатьох частинок (бозе- та фермі статистика частинок).	4
3	Оператори вторинного квантування	2
4	Комутаційні співвідношення для бозе-та фермі операторів народження а знищення.	2
5	Оператори поля - квантовані хвильові функції.	2
6	Комутаційні співвідношення для операторів поля.	2
7	Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні вторинного квантування.	4
8	Гамільтоніан Фреліха для опису взаємодіючих квазічастинок.	4

9	Основні властивості надпровідності. Опосередкована електрон-електронна взаємодія.	2
10	Куперівські пари у надпровіднику. Основний стан надпровідника.	2
11	Модельний гамільтоніан БКШ. Перетворення Боголюбова.	2
12	Класична функція Гріна для одночастинкового рівняння Шредінгера.	2
13	Рівняння Дайсона.	2
14	Різні типи функцій Гріна та їх зв'язок з кореляційними функціями.	2
15	Реакція системи на зовнішнє збурення.	2
16	Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні функцій Гріна .	2

Тематика семінарських занять

№	Назва теми	Кількість годин
1	Хвильові функції систем багатьох частинок.	1
2	Комутаційні співвідношення для бозе-та фермі операторів народження а знищення.	1
3	Комутаційні співвідношення для операторів поля.	1
4	Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні вторинного квантування.	1
5	Гамільтоніан Фреліха для опису взаємодіючих квазічастинок.	1
6	Куперівські пари у надпровіднику.	1
7	Основний стан надпровідника.	1
8	Модельний гамільтоніан БКШ.	1
9	Перетворення Боголюбова у теорії надпровідності.	1
10	Різні типи функцій Гріна та їх зв'язок з кореляційними функціями.	1
11	Реакція системи на зовнішнє збурення.	1
12	Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні функцій Гріна .	1

Зміст завдань для самостійної роботи

№ з/п	Назва теми	
1	Завдання і зміст курсу. Метод канонічних перетворень. Класифікація квазічастинок.	5
2	Хвильові функції бозе- та фермі-систем багатьох частинок у представленні чисел заповнення.	7
3	Унарні та бінарні оператори. Оператори вторинного квантування (народження та знищення частинок). Комутаційні співвідношення для операторів ВК для бозе- та фермі-систем.	7
4	Матричний елемент гамільтоніана системи частинок у ПВК. Оператори поля - квантовані хвильові функції та їх комутаційні співвідношення.	7
5	Коливний спектр кристалу в гармонічному наближенні. Динамічна матриця. Енергія коливань кристалічної ґратки, виражена через нормальні координати. Квантування коливань кристалічної ґратки. Гамільтоніан фононів у ПВК.	7
6	Фононний спектр іонного кристала. Квантування поля поляризації поздовжніх фононів. Гамільтоніан Фреліха.	7
7	Надпровідність, як стан системи та її властивості. Опосередкована електрон-електронна взаємодія. Куперівські пари. Основний стан надпровідника. Модельний гамільтоніан Бардіна-Купера-Шріффера.	10

	Перетворення Боголюбова у теорії надпровідності. Критична температура переходу у надпровідний стан.	
8	Класична функція Гріна, як розв'язок одночастинкового рівняння Шредінгера	5
9	Рівняння Дайсона.	5
10	Різні типи функцій Гріна та їх зв'язок з кореляційними функціями.	5
11	Реакція квантової системи на зовнішнє збурення.	5
12	Коливання атомів кристалічної ґратки у представленні функцій Гріна.	5

Примітка: контроль виконання завдань, винесених на самостійне опрацювання проводиться в рамках поточного модульного контролю. Бали за цю роботу входять у загальну кількість балів за конкретний модуль.

Методи та освітні технології навчання

1. Лекції: пояснювально-ілюстративний, репродуктивний метод та метод проблемного викладення.
2. Практичні (семінарські) заняття: розв'язуванням задач дослідницький, репродуктивний метод.
3. Самостійна робота: самонавчання, дослідницький метод.

Контроль та оцінювання навчальних досягнень студентів

у процесі вивчення дисципліни

Засоби оцінювання

Засобами оцінювання та демонстрування результатів навчання є:

- усне опитування ;
- перевірка аналітичних викладок під час семінарських занять;
- перевірка домашніх завдань.

Система контролю та оцінювання

Види та форми контролю: усні відповіді на контрольні запитання, самостійно виконані практичні завдання; презентації;

Форма підсумкового контролю: залік.

Перелік питань для самоконтролю й контролю навчальних досягнень здобувачів освіти з навчальної дисципліни

1. Описати метод вторинного квантування, як основу вивчення властивостей твердих тіл.
2. Пояснити принцип класифікації квазічастинок за типами.
3. Описати ідею метода канонічних перетворень для розв'язування задач багатьох частинок у фізиці твердого тіла.
4. Навести приклад використання метода канонічних перетворень для розв'язування задачі двох частинок у класичному і квантовому підході.
5. Проаналізувати хвильову функцію Бозе- систем багатьох частинок у представленні чисел заповнення.
6. Проаналізувати хвильову функцію Фермі-систем багатьох частинок у представленні чисел заповнення.
7. Дати означення унарного оператора у координатному представленні.
8. Дати означення унарного оператора у представленні чисел заповнення.
9. Дати означення бінарного оператора у координатному представленні.
10. Дати означення бінарного оператора. у представленні чисел заповнення.
11. Пояснити правило дії оператора вторинного квантування (народження) на хвильову функцію системи багатьох частинок.
12. Пояснити правило дії оператора вторинного квантування (знищення) на хвильову функцію системи багатьох частинок.
13. Проаналізувати комутаційні співвідношення для операторів вторинного квантування у випадку Бозе-систем.

14. Проаналізувати комутаційні співвідношення для операторів вторинного квантування у випадку Фермі-систем.
15. Проаналізувати матричний елемент гамільтоніана системи невзаємодіючих частинок у представленні вторинного квантування.
16. Описати процес отримання коливного спектра кристалу в гармонічному наближенні.
17. Пояснити поняття динамічної матриці та способи її використання.
18. Пояснити як отримується енергія коливань кристалічної ґратки, виражена через нормальні координати.
19. Пояснити як відбувається квантування коливань кристалічної ґратки.
20. Пояснити як отримується гамільтоніан фононів у ПВК.
21. Пояснити як отримується фононний спектр іонного кристала.
22. Пояснити як відбувається квантування поля поляризації поздовжніх фононів.
23. Пояснити як отримується гамільтоніан Фреліха, що описує електрон-фононну взаємодію в іонному кристалі.
24. Описати надпровідність, як стан системи та її властивості.
25. Описати основні властивості низькотемпературної надпровідності.
26. Пояснити як відбувається опосередкована електрон-електронна взаємодія.
27. Пояснити, що таке куперівські пари електронів.
28. Як описується основний стан надпровідника у найпростішій моделі БКШ.
29. Модельний гамільтоніан Бардіна-Купера-Шріффера для опису низькотемпературної надпровідності.
30. Пояснити етапи і принципи перетворення Боголюбова у теорії надпровідності.
31. Проаналізувати поняття критичної температури переходу у надпровідний стан.
32. Пояснити принципи використання часових кореляційних функцій
33. Пояснити принцип введення функції Гріна, як розв'язку одночастинкового рівняння Шредінгера.
34. Дати означення часових кореляційних функцій.
35. Проаналізувати спектральне представлення часових кореляційних функцій.
36. Описати властивості часових функцій Гріна для багаточастинкових систем.
37. Метод функцій Гріна, як основа вивчення проблем багатьох частинок. Функція Гріна для одночастинкового рівняння Шредінгера.
38. Дати означення одночастинкової функції Гріна та проаналізувати її зміст та спосіб використання.
39. Проаналізувати функцію Гріна вільного електрона.
40. Пояснити зв'язок функції Гріна з її Фур'є-образом.
41. Проаналізувати як уводиться густина станів енергетичного спектра.
42. Проаналізувати як пов'язана густина станів енергетичного спектра з уявною частиною функції Гріна.
43. Пояснити поняття оператора резольвенти
44. Пояснити поняття операторної функції Гріна.
45. Проаналізувати рівняння Дайсона та способи його використання у задачі багатьох частинок.
46. Дати означення оператора Віка та пояснити спосіб його використання.
47. Дати означення двохчасової функції Гріна багаточастинкової системи.
48. Проаналізувати енергетичне представлення для двохчасової загальної функції Гріна.
49. Проаналізувати енергетичне представлення для двохчасової випереджаючої функції Гріна.
50. Проаналізувати енергетичне представлення для двохчасової причинної функції Гріна.
51. Пояснити зв'язок енергетичного представлення двохчасових функцій Гріна зі спектральним представленням кореляційних функцій.
52. Проаналізувати реакцію квантової системи на зовнішнє збурення. Формула Кубо.

Критерії оцінювання результатів навчання з навчальної дисципліни

Критерієм підсумкового оцінювання є досягнення студентом мінімальних балів передбаченим результатами навчання коли студент в основному опанував теоретичні знання навчальної дисципліни, уміє розв'язувати задачі, орієнтується в першоджерелах та рекомендованій літературі, відповідно до вимог навчальної програми.

Розподіл балів, які отримують студенти

Поточне оцінювання (аудиторна та самостійна робота)												Підсумковий тест (залік)	Сума
Змістовий модуль 1							Змістовий модуль 2						
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12		
4	5	5	5	5	5	10	4	4	4	5	4	40	100

T1, T2 ... – теми змістових модулів.

Залежно від характеру відповіді студента зазначена кількість балів може бути скоригована за наступними критеріями:

К-ть балів	Критерії оцінки
max	студент дає вичерпну відповідь на поставлене запитання; правильно розв'язує задачі
0,8 · max	студент при відповіді на поставлене запитання припустився незначних неточностей, які не впливають на суть відповіді; допускає незначні помилки при розв'язуванні задач
0,6 · max	студент при відповіді на поставлене запитання припустився помилок, які виправляє за допомогою викладача; в середньому може дати правильні відповіді на 50% питань теми (задач);
0,4 · max	студент при відповіді на поставлене запитання припустився суттєвих помилок, які все ж таки виправляє за допомогою викладача; дає правильні відповіді на 30% питань теми (задач);
0,2 · max	отримує студент, який за допомогою викладача фрагментарно відповідає на запитання, проте не в повній мірі володіє мінімальним рівнем знань з даного питання;
0	якщо характер відповідей дає підставу стверджувати, що студент неправильно зрозумів суть питання чи не знав правильної відповіді, а тому відповідав, припускаючись грубих помилок.

Критерії оцінювання навчальних досягнень здобувачів освіти за шкалою ECTS та національною шкалою на екзамені з дисципліни "Метод вторинного квантування та функцій Гріна"

Здобувач освіти має відповісти на чотири питання у заліковому білеті. За відповідь на кожне питання здобувач освіти може максимально отримати 10 балів. Результати заліка оцінюються

відповідно до прийнятої уніфікованої університетської шкали: 40 балів від загальної 100-бальної, при цьому кожна відповідь оцінюється наступним чином:

0–2 балів. Здобувач освіти виявляє слабе уявлення про основні поняття, що викладаються у спецкурсі.

3-4 балів. Здобувач освіти має фрагментарні уявлення про основні поняття, що викладаються у спецкурсі.

5-6 балів. Здобувач освіти знає окремі факти, що стосуються питання, але не може впевнено сформувати цілісну картину. Здобувач освіти за допомогою викладача відтворює окремі частини начального теоретичного матеріалу, дає визначення основних понять і формулює окремі закони й закономірності, що розглядалися в курсі.

7-9 балів. Здобувач освіти самостійно відтворює значну частину навчального матеріалу, формулює закони й закономірності, що розглядалися в курсі, але допускає несуттєві помилки. Може пояснити основні аналітичні викладки.

10 балів. Здобувач освіти самостійно відтворює фактичний і теоретичний навчальний матеріал, пояснює суть фізичних явищ та методів квантової теорії поля. Здобувач освіти вільно володіє засвоєними знаннями.

У відомість обліку успішності та залікову книжку (індивідуальний навчальний план) здобувача освіти заноситься сумарна кількість балів поточного (0-60 балів) та підсумкового контролю (іспит; 0-40 балів) згідно такої таблиці:

Шкала оцінювання: національна та ЄКТС

Оцінка за національною шкалою	Оцінка за шкалою ECTS	
	Оцінка (бали)	Пояснення за розширеною шкалою
Відмінно	A (90-100)	відмінно
Добре	B (80-89)	дуже добре
	C (70-79)	добре
Задовільно	D (60-69)	задовільно
	E (50-59)	достатньо
Незадовільно	FX (35-49)	(незадовільно) з можливістю повторного складання

Зарахування результатів неформальної освіти

Відповідно до «Положення про взаємодію формальної та неформальної освіти, визнання результатів навчання (здобутих шляхом неформальної та/або інформальної освіти, в системі формальної освіти) у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича (протокол No109 від 28 березня 2022 року) ([polozhennia-pro-vzaiemodiiu-formalnoi-ta-neformalnoi-osvity.pdf](#)) у процесі вивчення дисципліни здобувачу освіти може бути зараховано до 25% балів, отриманих за результатами неформальної та/ або інформальної освіти з проблем, що відповідають тематиці курсу.

Політика академічної доброчесності

Освітня діяльність (викладача і здобувача освіти) під час вивчення навчальної дисципліни ґрунтується на принципах співробітництва та академічної доброчесності. Очікується, що роботи студентів будуть оригінальним дослідженням чи міркуванням й об'єктивно оцінені викладачем.

Дотримання політики щодо академічної доброчесності учасниками освітнього процесу при вивченні навчальної дисципліни регламентовано такими документами:

«Етичний кодекс Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича» <https://www.chnu.edu.ua/media/jxdfs0zb/etychnyi-kodeks-chernivetskoho-natsionalnoho-universytetu.pdf>;

«Положення про виявлення та запобігання академічного плагіату у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича»
https://www.chnu.edu.ua/media/f5eleobm/polozhennya-pro-zapobihannia-plahiatu_2024.pdf.

Рекомендована література (основна)

1. Вакарчук І.О. Квантова механіка : підручник / 4-те вид., доп.-Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с.
2. Юхновський І.Р. «Основи квантової механіки». – Київ: Либідь, 1995. – 352 с.
3. Глауберман А.Ю. «Квантова механіка». – Львів, Видавництво Львівського державного університету, 1962. – 506 с.
4. Ткач М.В., Сеті Ю.О., Войцехівська О.М. Квазічастинки у наносистемах. Квантові точки, дроти і плівки – Чернівці : «Книги –XXI». – 2015, 386 с.
5. М.В. Ткач, Ю.О. Сеті, О.М. Войцехівська. Діаграмна техніка у методі функцій Гріна квазічастинок, взаємодіючих з фононами. Чернівці : ЧНУ імені Ю. Федьковича, 2019, 164 с.
6. Стасюк І.В. «Функції Гріна у квантовій статистиці твердих тіл» – Львів, Видавництво Львівського державного університету, 1913. – 392 с.
7. Строїтелева Н.І., Кісельов Є.М. Фізика твердого тіла. Навчальний посібник – ЗДІА, Запоріжжя, 2018. – 145 с.
8. Martin R. Electronic Structure. Basic theory and practical methods. Cambridge 2004
9. Balzer K., Bonitz M. Nonequilibrium Green's Functions Approach to Inhomogeneous System.- Berlin, Heidelberg, NY.: Springer , 2013.-134p.
10. Bonitz M. Quantum Kinetic Theory – 2 nd .-ed. –Berlin, Heidelberg, NY.: Springer , 2016.-412p
11. Тирринг В. «Курс математической и теоретической физики. Квантовая механика больших систем». – TIMPANI, 2004. – 1039 с.
12. О.М.Войцехівська. Метод вторинного квантування для опису взаємодії частинок з фононами у твердих тілах. (Конспект лекцій).-Чернівці: "Рута", 2004. 62с.
13. О.М.Войцехівська. Основи методу вторинного квантування. (Навчальний посібник)-Чернівці: "Рута", 2005.59с.

Інформаційні ресурси

1. Physics of Solids I (MIT open courses) <https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-231-physics-of-solids-i-fall2006/index.htm>
2. Theory of Solids I (MIT open courses) <https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-511-theory-of-solids-i-fall-2004/>
3. Theory of Solids II (MIT open courses) <https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-512-theory-of-solids-ii-spring2009/>
4. Сторінка курсу в Moodle <https://moodle.chnu.edu.ua/course/view.php?id=7514>
5. Сторінка КІТКФ http://ptcsi.chnu.edu.ua/cafedra_page /загальна-інформація/
6. Сторінка наукової бібліотеки ЧНУ <http://www.library.chnu.edu.ua/index.php?page=ua>
7. Інші інформаційні ресурси інтернету.