

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Кафедра теоретичної фізики

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан
фізичного факультету

_____ Якібчук П. М.

“ _____ ” _____ 20__ р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

КВАНТОВА СТАТИСТИКА

галузь знань — **10** природничі науки
спеціальність — **104 Фізика та астрономія,**
фізичного факультету

2020–2021 навчальний рік

Робоча програма навчальної дисципліни «**Квантова статистика**» для студентів за галуззю знань **10 Природничі науки**, спеціальності **104 Фізика та астрономія** фізичного факультету, 2020 року. — 12 с.

Розробник:

Стецко Микола Миколайович, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної фізики

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри теоретичної фізики

Протокол від № “” червня 2020 р.

Завідувач кафедри теоретичної фізики

_____ (Ткачук В. М.)

“ ” _____ 2020 р

Схвалено Вченою радою фізичного факультету

Протокол від “ ” червня 2020 р. №

“ ” _____ 2020 р. Голова _____ (Якібчук П. М.)

© Львівський національний
університет імені Івана Франка,
2020

© Стецко М. М., 2020

1. Опис навчальної дисципліни

(Витяг з робочої програми навчальної дисципліни
“Квантова статистика”)

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		<i>денна форма навчання</i>	
Кількість кредитів – 7	галузь знань 10 Природничі науки	Вільного вибору	
Модулів – 3	Спеціальність 104 Фізика та астрономія спеціалізація «Теоретична фізика та астрофізика»	<i>Рік підготовки:</i> 4-й	<i>Рік підготовки:</i> 4-й
Змістових модулів – 4	Освітньо-кваліфікаційний рівень: Бакалавр	<i>Семестр</i> 7-й	<i>Семестр</i> 8-й
Загальна кількість годин – 210		<i>Лекції</i> 32 год.	<i>Лекції</i> 32 год.
Тижневих годин для денної форми навчання: <i>Аудиторних:</i> VII семестр – 4 VIII семестр – 5 <i>Самостійної роботи студента:</i> VII семестр – 1.625 VIII семестр – 2.5		<i>Практичні</i>	<i>Практичні</i>
		<i>Лабораторні</i> 32 год.	<i>Лабораторні</i> 48 год.
		<i>Самостійна робота</i> 26 год.	<i>Самостійна робота</i> 40 год.
		<i>Вид контролю:</i> залік	<i>Вид контролю:</i> іспит

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: ознайомлення студентів із математичним апаратом квантової статистичної фізики (вторинного квантування, представлення когерентних станів, метод функцій Гріна, основи діаграмної техніки). Ці методи є базовими при розв'язуванні різноманітних задач фізики конденсованого стану, зокрема в теорії металів, напівпровідників, магнетиків, надпровідників та ін.

Завдання: навчити студентів володіти математичним апаратом квантової статистики і самостійно розв'язувати основні задачі.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати основні рівняння та методи викладені у даному курсі.

вміти: використовувати методи викладені у програмі курсу.

Для слухачів курсу необхідними є знання з квантової механіки, статистичної фізики, лінійної алгебри, теорії функцій комплексної змінної та методів математичної фізики, зокрема інтегральних перетворень та теорії узагальнених функцій.

3. Програма навчальної дисципліни

МОДУЛЬ 1

Змістовий модуль 1. Вторинне квантування. Когерентні стани.

Тема 1. Представлення вторинного квантування

1. Тотожні частинки у квантовій механіці. Хвильова функція для системи тотожних частинок. Бозе- та фермі-системи.
2. Представлення чисел заповнення для систем бозе-частинок. Бозе-оператори народження і знищення.
3. Представлення чисел заповнення для систем фермі-частинок. Фермі-оператори народження і знищення.
4. Оператори для фізичних величин у представленні вторинного квантування. Рекурентне співвідношення для операторів у представленні вторинного квантування.
5. Спінові оператори у представленні вторинного квантування. Оператори Паулі. Перетворення Йордана-Вігнера.
6. Формалізм операторів Хаббарда.
7. Польові оператори. Рівняння руху для польових операторів.
8. Діагоналізація квадратичних форм за операторами народження-знищення.
9. Ферміони спіну $\frac{1}{2}$. Ідеальний фермі-газ при абсолютному нулі температур. Енергія Фермі та фермі-сфера. Одночастинкова кореляційна функція для ідеального фермі-газу при абсолютному нулі.
10. Парна функція розподілу для ідеального фермі-газу при абсолютному нулі. Структурний фактор та парна функція розподілу.
11. Електронний газ при абсолютному нулі температур, врахування кулонівської взаємодії. Перша поправка до енергії основного стану електронного газу, пряма та обмінна взаємодії.
12. Кореляційна функція та поправки до енергії електронів зумовлені кулонівською взаємодією.
13. Наближення Гартрі-Фока. Рівняння Гартрі-Фока.
14. Екранування в електронному газі. Наближення хаотичних фаз.
15. Ідеальний Бозе-газ. Парна функція розподілу.

16. Слабонеідеальний Бозе-газ. Метод наближеного вторинного квантування.
17. Термодинамічні функції для ідеальних квантових газів.
18. Коливання ланцюжків атомів. Акустичні та оптичні гілки коливань.
19. Коливання кристалічної ґратки в гармонічному наближенні. Нормальні координати. Квантування коливань кристалічної ґратки. Фонони.

Тема 2. Метод когерентних станів

1. Означення когерентного стану. Когерентні стани для гармонічного осцилятора та їх властивості.
2. Когерентні стани для бозонних систем. Оператори у представленні когерентних станів.
3. Когерентні стани для фермі-систем.

МОДУЛЬ 2

Змістовий модуль 2. Метод функцій Гріна.

Тема 3. Функції Гріна при абсолютному нулі температур.

1. Представлення взаємодії. Матриця розсіяння.
2. Функції Гріна та їх властивості. Рівняння руху для функцій Гріна.
3. Теорема Віка.
4. Рівняння Дайсона для функцій Гріна. Власноенергетична частина. Основи діаграмної техніки.
5. Багаточастинкові функції Гріна. Рівняння Бете-Солпітера. Вершинна функція.

Тема 4. Функції Гріна при скінченних температурах

1. Рівноважна система під дією зовнішнього збурення. Рівняння Блоха. Температурна матриця розсіяння.
2. Мацубарівські функції Гріна та їх властивості, мацубарівські частоти. Мацубарівські функції Гріна для ідеальних систем.
3. Температурна теорія збурень. Теорема Віка для температурних середніх.
4. Основи діаграмної техніки для мацубарівських функцій Гріна.
5. Двочасові температурні функції Гріна та кореляційні функції.
6. Спектральні представлення та рівняння руху для двочасових температурних функцій Гріна. Метод розщеплення для двочасових функцій Гріна.

МОДУЛЬ 3

Змістовий модуль 3. Ангармонізми коливань ґратки. Електрон-фононна взаємодія. Надпровідність.

Тема 5. Ангармонізми коливань ґратки. Електрон-фононна взаємодія.

1. Фонони у сильно ангармонічних кристалах. Методика незвідних двочасових функцій Гріна для ангармонічних систем.
2. Псевдогармонічне наближення та наближення самоузгоджених фононів.
3. Електрон-фононна взаємодія. Полярони. Ефективна взаємодія між електронами через фонони.

Тема 6. Надпровідність

4. Модель Бардіна-Купера-Шріфера. Куперівські пари. Нестабільність нормальної фази та перехід до надпровідного стану.
5. Основний стан та спектр одночастинкових збуджень в моделі БКШ. Перетворення Боголюбова. Омега-потенціал для надпровідника.
6. Функції Гріна в теорії надпровідності. Формалізм Намбу-Горькова, рівняння Горькова.

Змістовий модуль 4. Спінові системи. Магнетизм.

Тема 7. Спінові системи. Основи теорії магнетизму.

1. Спін-спінова взаємодія. Основні моделі в теорії магнетизму (моделі Ізінга та Гайзенберга). Типи магнітного впорядкування: феромагнітне, антиферомагнітне та спіральне впорядкування. Наближення середнього поля.
2. Спінові хвилі (магнони) у феромагнетиках. Магнони в антиферомагнетиках. Термодинамічні функції для феромагнітних та антиферомагнітних систем.
3. Рівняння для спінових функцій Гріна та розщеплення Тяблікова (в моделях Гайзенберга та де-Жена).
4. Мацубарівські функції Гріна в теорії спінових систем. Елементи діаграмної техніки.

5.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		Л	П	лаб	інд	ср
1	2	3	4	5	6	7
МОДУЛЬ 1						
Змістовий модуль 1. Вторинне квантування. Когерентні стани						
Тема 1. Представлення вторинного квантування.	74	26		28		20
Тема 2. Метод когерентних станів.	16	6		4		6
<i>Разом зм. модуль 1</i>	90	32		32		26
МОДУЛЬ 2						
Змістовий модуль 2. Метод функцій Гріна						
Тема 3. Функції Гріна при абсолютному нулі температур	32	8		14		10
Тема 4. Функції Гріна при скінченних температурах	32	8		14		10
<i>Разом – зм. модуль 2</i>	64	16		28		20
МОДУЛЬ 3						
Змістовий модуль 3. Ангармонізми коливань ґратки. Електрон-фононна взаємодія. Надпровідність.						
Тема 5. Ангармонізми коливань ґратки. Електрон-фононна взаємодія	14	4		4		6
Тема 6. Надпровідність	22	6		8		8
<i>Разом – зм. модуль 3</i>	36	10		12		14
Змістовий модуль 4.						
Тема 7. Спінові системи. Магнетизм	20	6		8		6
<i>Разом – зм. модуль 4</i>	20	6		8		6
Усього годин	210	64		80		66

7. Темі семінарських занять

Семінарські заняття в курсі не передбачені.

6. Темі практичних занять

Практичні заняття в курсі не передбачені.

8. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Симетризовані та антисиметризовані хвильові функції для систем тотожних частинок (на прикладі двох та трьох частинок). Оператори перестановок для систем тотожних частинок та їх властивості.	2
2	Оператори фізичних величин у представленні вторинного квантування (оператори імпульсу, кінетичної енергії, гамільтоніан).	4
3	Діагоналізація квадратичних форм за бозе- та фермі-операторами народження і знищення. Перетворення Боголюбова та Фур'є-перетворення.	8
4	Представлення вторинного квантування для спінових систем. Представлення Йордана-Вігнера, Швінгера та Гольдштейна-Примакова.	4
5	Ідеальний фермі-газ. Енергія та імпульс фермі для ідеального фермі-газу у випадку різної розмірності простору.	2
6	Електронний газ з парною взаємодією. Енергія основного стану електронного газу у двох- та трьохвимірному випадках. Поправки до енергії основного стану, пряма та обмінна взаємодії	4
7	Слабонеідеальний бозе-газ. Метод наближеного вторинного квантування.	4
8	Когерентні стани та їх властивості. Статистична сума ідеального бозе-газу у представленні когерентних станів.	2
9	Когерентні стани для фермі-систем. Грасманові змінні. Когерентні стани для спінових систем.	2
10	Представлення взаємодії. Хронологічне впорядкування для операторів.	2
11	Функції Гріна для ідеального виродженого фермі-газу.	2
12	Рівняння руху для функцій Гріна.	2
13	Теорема Віка.	2
14	Основи діаграмної техніки для функцій Гріна. Правила побудови діаграм. Рівняння Дайсона.	6
15	Мацубарівські функції Гріна. Властивості мацубарівських функцій Гріна. Мацубарівські частоти.	2
16	Мацубарівські функції Гріна для ідеальних систем. Підсумовування за мацубарівськими частотами	4
17	Основи діаграмної техніки для мацубарівських функцій Гріна	4
18	Двочасові температурні функції Гріна та кореляційні функції.	2
19	Метод розщеплення для функцій Гріна. Функція Гріна для бозе- (фермі) систем із парною взаємодією.	2
20	Функція Гріна для гармонічних фононів. Ангармонізми.	2
21	Електрон-фононна взаємодія. Гамільтоніан Фр'юліха.	2
22	Ефективна взаємодія між електронами. Гамільтоніан моделі БКШ.	2
23	Спектр одночастинкових збуджень у моделі БКШ. Метод канонічного перетворення та метод функцій Гріна.	4
24	Формалізм Намбу-Горькова. Теорія Еліашберга для електрон-фононного механізму надпровідності.	2
25	Модель Ізінга та модель Гайзенберга. Наближення середнього поля.	2
26	Магнони в феро- та антиферомагнетиках. Термодинамічні функції для феро- та антиферомагнетиків.	2
27	Двочасові функції Гріна в теорії магнітних систем. Метод розщеплення Тяблікова.	2

28	Основи діаграмної техніки для спінових операторів. Рівняння Дайсона та рівняння Ларкіна.	2
	Разом	80

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
VII семестр		
1	Фермі та бозе системи. Симетризація та антисиметризація хвильових функцій	2
2	Представлення вторинного квантування. Оператори у зображенні вторинного квантування	2
3	Бозе-оператори породження знищення. Фермі-оператори породження знищення	2
4	Гамільтоніани у представленні вторинного квантування	2
5	Спінові оператори у представленні вторинного квантування. Оператори Хаббарда	2
6	Діагоналізація операторів у представленні вторинного квантування. Метод рівнянь руху	2
7	Ідеальний фермі-газ при абсолютному нулі температур	2
8	Електронний газ з парною взаємодією. Поправки до енергії основного стану	2
9	Метод Гартрі-Фока	2
10	Слабонеідеальний бозе-газ	2
11	Коливання одновимірних одно- та двосортних ланцюжків атомів. Квантування коливань. Фонони	2
12	Когерентні стани для гармонічного осцилятора. Представлення когерентних станів. Властивості когерентних станів	2
13	Когерентні стани для фермі систем. Алгебра Грасмана	2
	Разом за VII семестр	26
VIII семестр		
14	Представлення взаємодії. Матриця розсіяння	2
15	Функції Гріна при абсолютному нулі температур	2
16	Теорема Віка.	2
17	Рівняння Дайсона для функцій Гріна. Основи діаграмної техніки	4
18	Двочастинкові функції Гріна для систем з парною взаємодією. Рівняння Бете-Солпітера	4
19	Мацубарівські функції Гріна	2
20	Діаграмна техніка для мацубарівських функцій Гріна	4
21	Двочасові температурні функції Гріна.	4
22	Метод розщеплення для двочасових функцій Гріна	2
23	Фонони у сильно ангармонічних кристалах. Електрон-фононна взаємодія	2
24	Надпровідність. Теорія Бардіна Купера Шріффера. Діаграмна техніка у теорії надпровідності.	4
25	Формалізм Намбу-Горькова. Теорія Еліашберга для електрон-фононного механізму надпровідності	4
26	Спінові системи. Модель Ізінга та модель Гайзенберга	2
27	Спінові хвилі у феромагнетиках та антиферомагнетиках	2

	Разом за VIII семестр	40
	Разом	66

9. Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання в курсі не передбачені.

10. Методи навчання

Під час вивчення навчальної дисципліни «Квантова статистика» застосовують такі методи навчання:

- *Наочні*: виведення на дошці основних співвідношень на лекціях і практичних заняттях;
- *Практичні*: завдання для лабораторних занять.

11. Методи контролю

Контроль засвоєння матеріалу включає поточний контроль (підсумкове тестування змістовими модулями, по 20 балів та 10 балів у VII та VIII семестрах відповідно), оцінку роботи на лабораторних заняттях (10 балів), оцінку розширеної доповіді за тематикою курсу (20 та 10 балів у VII та VIII семестрах відповідно) — разом за семестр 50 балів. Заліковий бал у VII семестрі дорівнює семестровій оцінці, помноженій на 2. Іспит — 50 балів (VIII семестр). Сумарна оцінка за кожен семестр, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою.

12. Розподіл балів, що присвоюється студентам

Розподіл балів, які отримують студенти

VII семестр

Поточне тестування та самостійна робота		Робота на лаб.	Доповідь	Сума
Змістовий модуль 1 Т1–Т2				
20		10	20	50x2=100

VIII семестр

Поточне тестування та самостійна робота			Робота на лаб.	Доповідь	Підсумковий тест (екзамен)	Сума
Змістовий модуль 2	Змістовий модуль 3	Змістовий модуль 4				
Т3	Т4–Т5	Т6				
10	10	10	10	10	50	100

Шкала оцінювання: Університету, національна та ECTS

Оцінка в балах	Оцінка ECTS	Визначення	За національною шкалою	
			Екзаменаційна оцінка, оцінка з диференційованого заліку	Залік
90–100	A	<i>Відмінно</i>	<i>Відмінно</i>	<i>Зараховано</i>
81-89	B	<i>Дуже добре</i>	<i>Добре</i>	
71-80	C	<i>Добре</i>		
61-70	D	<i>Задовільно</i>	<i>Задовільно</i>	
51-60	E	<i>Достатньо</i>		

13. Методичне забезпечення

До системи методичного забезпечення дисципліни належить програма курсу, робоча навчальна програма, тексти лекцій і пояснення до завдань для лабораторних робіт в електронному вигляді, тестові завдання для модульного контролю, тестові завдання для проведення іспиту, перелік теоретичних і практичних завдань для іспиту.

14. Рекомендована література

Базова

1. М. М. Боголюбов. Лекції з квантової статистики, — К.: Рад. школа, 1949.
2. І. В. Стасюк. Функції Гріна у квантовій статистиці твердих тіл, — Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2013.
3. Ч. Киттель. Квантовая теория твердых тел, — М.: Наука, 1967.
4. А. С. Давыдов. Теория твердого тела, — М.: Наука, 1976.
5. Р. Фейнман. Квантовая статистическая механика, — М.: Мир, 1975.
6. Н. Марч, У. Янг, С. Самптанпхар. Проблема многих тел в квантовой механике, — М.: Мир, 1969.
7. А. А. Абрикосов, Л. П. Горьков, И. Е. Дзялошинский. Методы квантовой теории поля в статистической физике, — М.:Физматгиз, 1962.
8. В. Г. Барьяхтар, В. Н. Криворучко, Д. А. Яблонский. Метод функций Грина в теории магнетизма, — К.: Наукова думка, 1984.
9. G. D. Mahan. Many-particle physics, — N.Y.: Plenum press, 1993.
10. A. E. Zagoskin. Quantum theory of Many Body Systems, — Berlin, New York, Heidelberg: Springer Verlag, 1998.
11. A. L. Fetter, J. D. Walecka. Quantum theory of many particle systems, — N. Y.: McGraw-Hill, 1971.
12. A. Atland, B. Simons. Condensed matter field theory, — Cambridge: Cambridge university press, 2010.

Допоміжна

1. С.В. Тябликов. Методы квантовой теории магнетизма, — М.: Наука, 1975.
2. А. И. Ахиезер, С. В. Пелетминский. Методы статистической физики, — М.: Наука, 1977.
3. Ф. А. Березин, Метод вторичного квантования, — М.: Наука, 1986.
4. Ю. А Изюмов, М. И. Кацнельсон, Ю. Н. Скрябин. Магнетизм коллективизированных электронов, — М.: Физматлит, 1994.
5. Д. Н. Зубарев. Неравновесная статистическая термодинамика, — М.: Наука, 1971.
6. Л. Каданов, Г. Бейм. Квантовая статистическая механика, — М.: Мир, 1964.

15. Інформаційні ресурси

1. Wikipedia.
2. Arxiv. www.arxiv.org