

## 1. Опис навчальної дисципліни

(Витяг з робочої програми навчальної дисципліни  
 “Вибрані питання квантової статистичної механіки”)

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		<i>денна форма навчання</i>
Кількість кредитів — <b>5.0</b>		Вільного вибору
Модулів — <b>2</b>	Галузь знань <b>0402 «Фізико-математичні науки»</b>	<i>Рік підготовки:</i> <b>6-й</b>
Змістових модулів — <b>2</b>	Спеціальність <b>8.04020301 «Фізика»</b> спеціалізація <b>«Теоретична фізика»</b>	
Загальна кількість годин — <b>150</b>		<i>Семестр</i> <b>11-й</b>
		<i>Лекції</i> <b>32 год</b>
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних — <b>3</b> самостійної роботи студента — <b>7</b>	Освітньо-кваліфікаційний рівень: <b>магістр</b>	<i>Практичні, семінарські</i> —
		<i>Лабораторні</i> <b>16 год</b>
		<i>Самостійна робота</i> <b>102 год</b>
		<i>Вид контролю: іспит</i>

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Метою** спецкурсу є побудова теорії термодинамічних функцій, зокрема внутрішньої енергії та теплоємності в широкотемпературному діапазоні, такої сильнонеідеальної квантової системи як рідкий гелій-4.

**Завдання:** Перша частина присвячена побудові теорії матриці густини багатобозонної системи в координатному зображенні. Матриця густини представлена у вигляді добутку матриці густини ідеального бозе-газу з ефективною масою частинок на кореляційний фактор больцманівського типу із деяким ефективним потенціалом  $U$ . Для розрахунку кореляційного фактора побудуємо інтегральне рівняння для матриці густини, з якою визначаємо функцію  $U$ .

За допомогою знайденої так матриці густини розраховуємо середню кінетичну енергію і рідинний структурний фактор, який визначає середню потенціальну енергію.

Одержані точно виразу відтворюють при низьких температурах відповідні формули теорії М. Боголюбова, а у високотемпературній квазікласичній межі приводять до добре відомих результатів теорії класичних рідин у так званому наближенні хаотичних фаз (RPA-наближення).

Для розрахунку ефективної маси частинок, яка входить як параметр у вищезгадані вирази, обчислюємо одночастинковий енергетичний спектр системи з виразу для великого термодинамічного потенціалу  $\Omega$  в RPA-наближенні знайденого в рамках методу функціонального інтегрування.

Чисельні розрахунки теплоємності рідкого  $^4\text{He}$  демонструють добре узгодження з експериментальними вимірюваннями у всій ділянці температур, і зокрема в околі точки  $\lambda$ -переходу, точки фазового переходу рідкого  $^4\text{He}$  у надплинний стан.

Отже, запропоновані методи і результати розрахунку термодинамічних і структурних функцій можуть бути використані для дослідження інших квантових багаточастинкових систем.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен:

**знати:** математичні методи дослідження багаточастинкових квантових систем.

**вміти:** застосовувати методи, викладені в курсі, для доведення результатів до числа і порівняння їх із результатами вимірювань.

Для слухачів курсу необхідними є знання зі основ квантової механіки, статистичної механіки, теорії класичних рідин.

## 3. Програма навчальної дисципліни

### МОДУЛЬ 1

#### Змістовий модуль 1. Матриці густини багатобозонної системи

#### Тема 1. Інтегральне рівняння для матриці густини.

1. Вступ.
2. Матриця густини багаточастинкової системи в координатному зображенні. Означення. Властивості. Матриця густини ідеального газу.
3. Побудова основного інтегрального рівняння для матриці густини багатобозонної системи з ваговою функцією  $\varphi$ .
4. Розрахунок правої частини основного рівняння. Ефективний багаточастковий потенціал  $U$ . Вибір функції  $\varphi$ . Рівняння для потенціала  $U$ .
5. Розв'язок рівняння для функції  $U$  у наближенні парних кореляцій.
6. Ліва сторона основного рівняння. Вибір матриці густини у вигляді добутку матриці

густини ідеального бозе-газу на кореляційний фактор  $P$ . Ефективна маса частинок, як результат багаточастинкових кореляцій.

7. Інтегрування матриці густини за штрихованими координатами з ваговою функцією  $\phi$  в наближенні парних кореляцій.
8. Рівняння для коефіцієнтної функції кореляційного фактора  $P$ . Розв'язок рівнянь.

## МОДУЛЬ 2

### *Змістовий модуль 2. Термодинамічні і структурні функції квантової рідини*

#### **Тема 2. Розрахунок кінетичної енергії структурного фактора і ефективної маси.**

9. Розрахунок середньої кінетичної енергії багатобозонної системи.
10. Розрахунок повного рідинного структурного фактора і середньої потенціальної енергії.
11. Метод функціонального інтегрування в квантовій статистичній механіці.
12. Термодинамічний функціонал. Наближення хаотичних фаз для термодинамічного функціонала.
13. Розрахунок великого термодинамічного потенціала  $\Omega$  в наближенні парних кореляцій.
14. Перенормування одночастинкового спектра. Ефективна маса
15. Теорія теплоємності бозе-рідини для температур вище критичної.
16. Аналіз чисельних розрахунків теплоємності рідкого  $^4\text{He}$  та порівняння з експериментом.

## **4. Структура навчальної дисципліни**

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
л		п	лаб	інд	сп	
1	2	3	4	5	6	7
<b>МОДУЛЬ 1</b>						
<i>Змістовий модуль 1. Матриці густини багатобозонної системи</i>						
Тема 1. Інтегральне рівняння для матриці густини.	78	16		8		54
<i>Разом – зм. модуль 1</i>	78	16		8		54
<b>МОДУЛЬ 2</b>						
<i>Змістовий модуль 2. Термодинамічні і структурні функції квантової рідини</i>						
Тема 2. Розрахунок кінетичної енергії структурного фактора і ефективної маси.	72	16		8		48
<i>Разом – зм. модуль 2</i>	72	16		8		48
<b>Усього годин</b>	<b>150</b>	<b>32</b>		<b>16</b>		<b>102</b>

## **5. Темі семінарських занять**

Семінарські заняття в курсі не передбачені.

## **6. Темі практичних занять**

Практичні заняття в курсі не передбачені.

## 7. Теми лабораторних занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Рівняння для ефективного потенціала.	2
2	Метод незвідних середніх.	2
3	Розрахунок якобіану переходу від індивідуальних координат частинок до колективних.	2
4	Розв'язок рівнянь для коефіцієнтних функцій ефективного потенціалу.	2
5	Розв'язок алгебраїчних рівнянь коефіцієнтів логарифма кореляційного фактора.	2
6	Обчислення пост-RPA поправок для середньої кінетичної енергії.	2
7	Обчислення структурного фактора невзаємодіючих бозонів при наднизьких температурах.	2
8	Обчислення ефективної маси в області фазового переходу.	2
	<b>Разом</b>	<b>16</b>

## 8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	К-сть годин
1	Розрахунок матриці густини системи ідеальних бозе-частинок.	17
2	Дослідження матриці густини в границі низьких і високих температур.	17
3	Термодинамічні функції в основному стані бозе-рідини.	17
4	Дослідження перенормованого одночастинкового спектра.	17
5	Ефективна маса частинки в бозе-рідині при температурі абсолютного нуля.	17
6	Дослідження поляризаційного оператора нижче температури бозе-конденсації.	17
	<b>Разом</b>	<b>102</b>

## 10. Методи навчання

Під час вивчення навчальної дисципліни «Вибрані питання квантової статистичної механіки» застосовують такі методи навчання:

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

## 11. Методи контролю

Контроль засвоєння матеріалу включає поточний контроль (підсумкове тестування за двома змістовими модулями, по 10 балів), оцінку роботи на лабораторних заняттях (10 балів), оцінку розширеної доповіді за тематикою курсу (20 балів) — разом за семестр 50 балів, іспит (50 балів). Сумарна оцінка, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою.

## 12. Розподіл балів, що присвоюється студентам

### Розподіл балів, які отримують студенти

Поточне тестування та самостійна робота		Робота на лаб.	Доповідь	Іспит	Сума
Змістовий модуль 1	Змістовий модуль 2				
<b>T1</b>	<b>T2</b>				
10	10	10	20	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	<b>A</b>	<i>Відмінно</i>	<i>Відмінно</i>	<i>Зараховано</i>
81-89	<b>B</b>	<i>Дуже добре</i>	<i>Добре</i>	
71-80	<b>C</b>	<i>Добре</i>		
61-70	<b>D</b>	<i>Задовільно</i>	<i>Задовільно</i>	
51-60	<b>E</b>	<i>Достатньо</i>		

## 13. Методичне забезпечення

1. *I. Вакарчук*. Квантова механіка (§ 81, с. 633, пр. 1–3, с. 641–643; §91, с. 710; § 109; с. 819, пр. 2, с 834, пр. 3 с 837).— Львів, 2007.

## 14. Рекомендована література

### Базова

1. *Vakarchuk I. O.* A self-consistent theory of liquid  $^4\text{He}$  // J. Phys. Stud.— 2004.— V. 8, No. 3.— P. 223-240.
2. *Vakarchuk I. O., Pastukhov V. S., Prytula R. O.* Theory of structure and thermodynamic function of liquid  $^4\text{He}$  (Review Article) // Fiz. Nizk. Temp.— 2013.— V. 39, No. 9.— P. 958–969.

### Допоміжна

1. *N. H. March, W. H. Young, S. Sampanthar*, The Many- Body Problem in Quantutum Mechanics (Cambridge University Press, 1967).; *Марч Н., Янг У., Сампантхар С.* Проблема многих тел в квантовой механике. М: Мир, 1969. .
2. *A. Isihara*, Statistical Physics (Academic Press, New York, 1971); *Исихара А.* Статистическая физика. М.: Мир, 1973.
3. *Вакарчук І. О., Притула Р. О.* Структурні функції рідкого  $^4\text{He}$  з урахуванням непрямих три- і чотиричастинкових кореляцій // Журн. фіз. дослідж.— 2008.— Т. 12, №4.— 4001.— 12 с.
4. *Вакарчук І. О., Притула Р. О.* Температурна залежність парної функції розподілу рідкого  $^4\text{He}$  // Журн. фіз. дослідж.— 2009.— Т. 13, №2.— 2003.— 5 с.

## 15. Інформаційні ресурси

1. Eric Weisstein's World of Physics <http://scienceworld.wolfram.com/physics/>
2. Wikipedia. <http://www.wikipedia.org>