

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор навчально-наукового інституту

«Фізико-технічний факультет»

(вказати назву структурного підрозділу)

Кузнецов І.І.

(вказати ПІБ керівника)

“ 28 вересня ” 2023 Р.

## РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Квантова статистична фізика та критичні явища

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти	1 рівень (магістерський)
галузь знань	10 «Природничі науки»
спеціальність	105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
освітня програма	«Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми (освітньо-наукова програма)
спеціалізація	
вид дисципліни	обов'язкова
факультет	ННІ «Фізико-технічний факультет»

2023/2024 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою факультету (інституту, центру)  
“21” \_вересня\_ 2022\_ року, протокол № 9

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади) **Клепиков В.Ф.** доктор фізико-математичних наук, професор, член-кор. НАН України, професор кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера  
Протокол від “16” \_червня\_ 2023 року № 10

Завідувач кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера



\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микола ШУЛЬГА  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-методичною комісією ННІ «Фізико-технічний факультет»  
(назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна)

Протокол від “14” \_серпня\_ 2023 року № 11

Голова науково-методичної комісії ННІ «Фізико-технічний факультет»



\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микола ЮНАКОВ  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “ Квантова статистична фізика та критичні явища” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки

2 (магістерський) рівень вищої освіти  
(назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня)

спеціальності (напрямку) 105 Прикладна фізика та наноматеріали

(Освітньо-наукова програма "Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми")

### 1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є надати повноцінні знання з теорії квантових суцільних середовищ, що дає можливість свідомо та якісно засвоїти знання з багатьох інших спеціальних дисциплін.

1.2. Основними завданнями вивчення дисципліни є засвоїти основи теорії квантових суцільних середовищ, яка базується на методах механіки суцільних середовищ. Здобути теоретичну базу знань для практичного застосування результатів теорії квантових суцільних середовищ у сучасній фізиці.

1.3. 8 кредитів

1.4. Загальна кількість годин 240.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни <b>Квантова статистична фізика та критичні явища</b>	
Нормативна	
Денна форма навчання	
Рік підготовки	
1-й магістратури	
Семестр	
1-й	2-й
Лекції	
48 год.	48 год.
Практичні, семінарські заняття	
Лабораторні заняття	
-	-
Самостійна робота,	
72 год.	72 год.
у тому числі індивідуальні завдання	
1	2

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

**знати:** загальні властивості квантових суцільних середовищ, які можна описувати за допомогою квазічастинкового підходу та дворідинної моделі Ландау надплинної бозе-рідини на базі методів механіки суцільних середовищ. Феноменологічний підхід та методи квантової теорії поля, до складу яких входять функції Гріна та діаграми Феймана. Знати результати використання цих методів для визначення властивостей нормальних та надплинних фермі-рідин, надплинних бозе-систем та сумішей фермі-, бозе- частинок.

**уміти:** здобуту теоретичну базу знань застосовувати для розв'язання різних задач сучасної теоретичної фізики.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

### Розділ 1. Квантові суцільні середовища

Тема 1. Визначення квантових рідин та кристалів.

1. Визначення та умови існування квантових рідин.
2. Бозе – та фермі – квантові рідини у мезосвіті, космосі та мікросвіті.
3. Квантові кристали.
4. Енергія бозе- рідини поблизу основного стану. Фізичний зміст першої та другої варіаційних похідних від енергії, яка є функціонал від щільності рідини.
5. Перша та друга функціональні похідні від енергії по щільності у довгохвильовій границі.
6. Енергетичний спектр бозе- рідини поблизу основного стану.
7. Критерій надплинності Ландау .
8. Дворідинна модель Ландау надплинної бозе- рідини.
9. Механокалоричний ефект у надплинній рідині.
10. Вимірювання щільності та в'язкості газу теплових збуджень.

Тема 2. Рух надплинної компоненти.

1. Система рівнянь механіки суцільних середовищ, що описує надплинну компоненту.
2. Утворення плівки надплинної компоненти на твердій підкладці.
3. Рівняння для довгих хвиль надплинної компоненти, яка має вільну поверхню.
4. Малі коливання поверхні надплинної компоненти у полі сили тяжіння та у полі сили Ван- дер- Ваальса.
5. Хвилі кінцевої амплітуди та утворення розривів у плівках надплинної компоненти.
6. Рівняння Кортевега де – Фріза у товстих та тонких плівках надплинної компоненти.
7. Односолітонне рішення рівняння Кортевега де-Фріза.
8. Загасання коливань у плівках надплинної компоненти.
9. Особливості розповсюдження коливань у надплинній компоненті, яка рухається.

Тема 3. Реєстрація та методи опису газу теплових збуджень.

1. Виміри спектру теплових збуджень надплинного гелію методом розсіяння нейтронів.
2. Швидкість руху фононів,  $R^-$  та  $R^+$  ротонів.
3. Реєстрація теплових збуджень методом квантового випаровування атомів.
4. Опис теплових збуджень методами механіки суцільних середовищ.
5. Зв'язок енергії та імпульсу малих коливань рідини з частотою та хвильовим вектором теплового збудження.
6. Модель квазічастинки як хвильового пакету та швидкість його руху.
7. Кінетичне рівняння для квантового газу.
8. Розподіл Бозе та Фермі для квантового газу частинок та газу теплових збуджень.

9. Фізичний зміст дрейфової швидкості, яка міститься у розподілах Бозе та Фермі.

#### Тема 4. Основні властивості газу теплових збуджень.

1. Щільність числа фононів та ротонів.
2. Середнє значення модуля швидкості руху фононів та ротонів.
3. Щільність енергії фононного та ротонного газів.
4. Щільність нормальної компоненти, яка обумовлена фононами та ротонами.
5. Реєстрація стрибка температури на границі розділу двох суцільних середовищ (стрибок Капіци).
6. Зв'язок теплоопору границі розділу двох суцільних середовищ з потоком тепла через границю.
7. Ймовірність проходження фонону через границю розділу двох суцільних середовищ.
8. Вирахування теплоопору границі розділу двох середовищ, виходячи із ймовірності проходження фонону.
9. Додатковий потік тепла через границю розділу двох середовищ, обумовлений дефектами границі.
10. Імпульс переданий границі розділу надплинний гелій – тверде тіло при падінні на неї фонона,  $R^-$  та  $R^+$  ротонів.
11. Температурна залежність тиску фононного  $R^-$  та  $R^+$  ротонного газів на границю розділу.

#### Тема 5. Осмотичний тиск газу теплових збуджень.

1. Різниця осмотичного тиску газу теплових збуджень та тиску надплинної компоненти між двома посудинами, які мають різну температуру.
2. Щільність імпульсів нормальної та надплинної компонент у широкому каналі, що з'єднує дві посудини, які мають різну температуру.
3. Конвективне вирівнювання температури у надплинній рідині, яка перебуває у спокої.
4. Вимірювання осмотичного тиску газу теплових збуджень.
5. Рівняння руху надплинної компоненти.
6. Термомеханічний ефект (ефект фонтанування).
7. Реєстрація парадоксу Делаμβера в умовах руху надплинної компоненти.
8. Використання надплинної рідини у космічних польотах.

#### Тема 6. Рівняння механіки суцільних середовищ надплинної рідини та їх рішення.

1. Отримання макроскопічних рівнянь надплинної рідини, виходячи з законів збереження маси імпульсу та енергії.
2. Граничні умови на поверхні розділу надплинна рідина – тверде тіло.
3. Малі коливання надплинної рідини.
4. Способи збудження першого та другого звуків у надплинному гелії.
5. Розповсюдження звуку у надплинній рідині, коли нормальна компонента загальмована ( третій та четвертий звуки ).
6. Коливання надплинної рідини у каналах довільної ширини.

#### Тема 7. Квантовані вихори у квантових рідинах.

1. Надплинний гелій у посудині, яка обертається ( дослід Андронікашвілі ).
2. Теорія Феймана квантованих вихорів у надплинному гелії.
3. Критична швидкість обертання, при якій утворюється лінійний вихор. Енергія та момент кількості рухів вихрової лінії.

4. Імітація обертання надплинної компоненти. Критична швидкість обертання, при якій надплинна рідина переходить у нормальний стан.
5. Нестійкість тангенціального розриву у надплинній компоненті.
6. Критична швидкість руху надплинної компоненти, яка обумовлена народженням вихору.
7. Рух позитивних та негативних іонів у надплинному гелії. Утворення вихорів, в умовах руху іонів у надплинному гелії.
8. Надплинність електронної рідини та типи надпровідників. Вихори у надплинній електронній рідині.
9. Надплинність нейтронної рідини у пульсарах. Вихори у надплинній нейтронній рідині пульсарів, які обертаються.

## *Розділ 2* Квантові системи багатьох частинок

### Тема 1. Нормальна фермі- рідина.

1. Газ невзаємодіючих ферміонів. Квазічастковий опис фермі-рідини.
2. Визначення енергії квазічастинки.
3. Функція розподілу квазічастинки.
4. Межі застосування квазічастинкового опису.
5. Дирчасто-частинковий формалізм.
6. Функція розподілу газу збудження фермі- систем. Причини відсутності надплинності нормальної фермі-рідини.
7. Отримання ефективної маси квазічастинки.
8. Нульовий звук у фермі-рідині.

### Тема 2. Функції Гріна фермі-систем при нульовій температурі.

1. Визначення та фізичний зміст функції Гріна.
2. Функція Гріна невзаємодіючих фермі-частинки.
3. Фур'є – образ функції Гріна невзаємодіючих фермі-частинки.
4. Полюси функції Гріна взаємодіючих частинок. Квазічастинки.
5. Спектральна функція.
6. Перехід від заданого числа частинок до заданого хімпотенціалу.

### Тема 3. Діаграми Феймана при нульовій температурі.

1. Зображення взаємодії. Оператор часової еволюції та його розклад в ряд по взаємодії.
2. Розклад функції Гріна в ряд по взаємодії.
3. Нульова та перша поправки по взаємодії до функції Гріна. Теорема Віка.
4. Діаграмна техніка у координатному просторі. Причина врахування тільки зв'язаних діаграм.
5. Діаграмна техніка в імпульсному просторі.
6. Метод часткового підсумування діаграм . Наближення Хартрі та Хартрі- Фока.
7. Власно-енергетичні частки діаграм. Рівняння Дайсона. Масовий оператор.
8. Полярізаційні та вершкові частки діаграм. Одягання скелетних діаграм. Графічно точне зображення масового оператора.
9. Багаточастинкові функції Гріна. Зв'язок двочастинкової функції Гріна з одночастинковими.

### Тема 4. Температурні функції Гріна.

1. Функція Гріна при кінцевій температурі.
2. Визначення температурної ( Мацубаровської ) функції Гріна. Її властивості.
3. Фур'є – образ температурної функції Гріна.
4. Температурна функція Гріна невзаємодіючих частинок та її фур'є – образ.

5. Полюси температурної функції Гріна.
6. Спектральна функція температурної функції Гріна та її нормування.
7. Отримання розподілу частинок по імпульсам за допомогою спектральної функції .
8. Температурне зображення взаємодії. Оператор температурної еволюції та його розклад в ряд по взаємодії.
9. Розклад температурної функції Гріна в ряд по взаємодії.
10. Діаграмна техніка у координатному та імпульсному просторах при кінцевій температурі.
11. Рівняння Дайсона. Двочастинкова температурна функція Гріна.

Тема 5. Надплинні фермі- рідини.

1. Відсутність надплинності у нормальній фермі- рідині та надплинність ферміоних пар. Надплинні фермі-рідини у мезомірі, космосі та мікромірі.
2. Методи отримання низьких температур. Ефект Джоуля-Томсона. Метод відкачки насиченого пару. Метод адеабатичного розмагнічення парамагнітних солей та ядер.
3. Ентропія та незвичайні властивості рідкого та твердого  $^3\text{He}$  при низьких температурах. Отримання зверхнизьких температур методом Померанчука.
4. Різні фази надплинного  $^3\text{He}$  та їх властивості. Анізотропія надплинної щільності та безщільна надплинність.

Тема 6. Системи слабозвзаємодіючих бозе-частинок.

1. Бозе- Ейнштейнівська конденсація.
2. Енергетичний спектр слабо неідеального бозе-газу. Надплинність.
3. Розподіл слабо взаємодіючих частинок по імпульсам.
4. Експерименти з Бозе—Ейнштейнівської конденсації. Метод лазерного охолодження та випарювання бозонів в магнітній пастці.

Тема 7. Взаємодія теплових збуджень надплинної бозе- рідини.

1. Отримання Гамільтоніану взаємодіючих теплових збуджень виходячи з Гамільтоніану слабо неідеального бозе-газу.
2. Гідродинамічний гамільтоніан Ландау. Квантування фононного поля. Гамільтоніан невзаємодіючих фононів.
3. Гамільтоніан трифононної та чотирифононної взаємодії.
4. Трифононні процеси та час трифононної релаксації.
5. Чотирифононні процеси та їх діаграмний опис. Час чотирифононної релаксації.
6. Кінетичні коефіцієнти надплинної рідини.
7. Народження високоенергійних фононів холодним пучком фононів у надплинному гелії, що обумовлене трифононними та чотирифононними процесами.
8. Утворення гарячої лінії у надплинному гелії за рахунок трифононних процесів.

### 3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
л		п	лаб.	інд.	с. р.	л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Розділ 1. Квантові суцільні середовища</b>												
Разом за розділом 1	120	48				72						
<b>Розділ 2. Квантові системи багатьох частинок</b>												
Разом за розділом 2	120	48				72						
<b>Усього годин</b>	240	96				144						

#### 4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1		
2		
	Разом	

#### 5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Визначення квантових рідин та кристалів.	10
2	Рух надплинної компоненти.	10
3	Реєстрація та методи опису газу теплових збуджень.	10
4	Основні властивості газу теплових збуджень.	10
5	Осмотичний тиск газу теплових збуджень.	10
6	Рівняння механіки суцільних середовищ надплинної рідини та їх рішення.	12
7	Квантовані вихори у квантових рідинах.	10
8	Нормальна фермі- рідина.	10
9	Функції Гріна фермі-систем при нульовій температурі.	10
10	Діаграми Феймана при нульовій температурі.	10
11	Температурні функції Гріна.	10
12	Надплинні фермі- рідини.	12
13	Системи слабозаємодіючих бозе-частинок.	10
14	Взаємодія теплових збуджень надплинної бозе- рідини.	10
	Разом	144

#### 6. Індивідуальні завдання

#### 7. Методи навчання

При викладанні квантової статистичної фізики та критичних явищ використовують словесні, наочні, практичні та дискусійні методи навчання. На лекціях використовують найчастіше словесний, наочний та дискусійний методи. На практичних заняттях найчастіше використовують практичний та дискусійний методи. Під час самостійної роботи знаходять застосування всі згадані методи навчання.

#### 8. Методи контролю

Навчальним планом передбачені наступні методи контролю:

- Поточний контроль:
- у перший семестр передбачає 1 контрольну роботу та курсова робота,
- у другий семестр передбачає 1 контрольну роботу.

Підсумковий семестровий контроль – це залік у першому семестрі та іспит у другому семестрі у комбінованій формі.



## 9. Схема нарахування балів

### 1 семестр

Контрольна робота	30
Курсова робота	30
Іспит	40
Сума	100

### 2 семестр

Контрольна робота	40
Практичні заняття	20
Залік	40
Сума	100

### Критерії оцінювання навчальних досягнень

Критерії оцінювання **контрольних робіт** Контрольні роботи містять теоретичні питання та 1 задачу.

Критерії оцінювання теоретичних питань:

- Повна розгорнута відповідь - 10 бали.
- Повна, але не розгорнута відповідь - 7 бали.
- Повна, але не розгорнута відповідь, яка містить незначну помилку чи суперечність, - 4 балів.
- Неповна відповідь, яка не містить критичних помилок чи суперечностей, - 2 бал.
- Відповідь, що містить критичну помилку чи неточність, або відсутність відповіді оцінюється в 0 балів.

Критерії оцінювання розв'язання задачі:

- Студент отримав загальний розв'язок і правильно вирахував числове значення відповіді - 10 бал.
- Студент отримав загальний розв'язок, але неправильно вирахував числове значення відповіді або помилився в одиницях вимірювання - 7 бали.
- Студент правильно виписав необхідні для розв'язання закони та рівняння, але не зміг отримати загальний розв'язок - 4 бали.
- Студент не повністю виписав необхідні для розв'язання закони та рівняння - 2 бал.
- Студент неправильно виписав необхідні для розв'язку закони та рівняння, чи розв'язок взагалі відсутній - 0 балів.

**Підсумковий контроль** у другому семестрі проводиться в формі екзамену. Екзаменаційне завдання: білет містить два теоретичних питання та одну задачу:

Перше питання до 15 балів.

Друге питання до 15 балів.

Розв'язання задачі до 20 балів.

Критерії оцінювання теоретичних питань:

Повна розгорнута відповідь - 15 балів.

Повна, але не розгорнута відповідь - 13 балів.

Повна, але не розгорнута відповідь, яка містить незначну помилку чи суперечність, - 10 балів, за кожну наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал.

Неповна відповідь, яка не містить критичних помилок чи суперечностей, -8 балів, за кожен наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал.

Відповідь, що містить критичну помилку чи неточність, або відсутність відповіді оцінюється в 0 балів.

#### Критерії оцінювання розв'язання задачі:

Студент отримав загальний розв'язок і правильно вирахував числове значення відповіді - 20 балів.

Студент отримав загальний розв'язок і неправильно вирахував числове значення відповіді - 17 балів.

Студент отримав загальний розв'язок, але помилився в одиницях вимірювання - 13 балів.

Студент правильно виписав необхідні для розв'язання закони та рівняння, але не зміг отримати загальний розв'язок - 8 балів.

Студент не повністю виписав необхідні для розв'язання закони та рівняння - 2 бали.

Студент не правильно виписав необхідні для розв'язку закони та рівняння, чи розв'язок взагалі відсутній 0 балів.

Число балів, які студент отримав на екзамені, є сумою балів, що були отримані за кожне завдання з екзаменаційного білету.

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою що наведена нижче.

Для допуску до складання підсумкового контролю (екзамену) здобувач вищої освіти повинен набрати не менше 15 балів з навчальної дисципліни під час поточного контролю, самостійної роботи, індивідуального завдання.

### Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
	для чотирирівневої шкали оцінювання
90 – 100	<b>відмінно</b>
70-89	<b>добре</b>
50-69	<b>задовільно</b>
1-49	<b>незадовільно</b>

## 9. Рекомендована література

### Основна література

1. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, (1970). Statistical Physics. Vol. 5 (2nd ed.). Pergamon Press. ISBN 0-08-009103-2.
2. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, (1984). Electrodynamics of Continuous Media. Vol. 8 (2nd ed.). Pergamon Press. ISBN 0-08-030276-9.
3. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, (1986). Fluid Mechanics. Vol. 6 (2nd ed.). Pergamon Press. ISBN 0-08-033933-6.

4. H. Eugene Stanley, (1971). Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena. Claredon Press. Oxford, ISBN-10: 0195053168.

#### **Допоміжна література**

1. D.R. Tilley, J. Tilley Superfluidity and Superconductivity. (3rd ed.), IOP Publishing Ltd. 1990.
2. М.М. Боголюбов. Лекції з квантової статистики. К., Рад. школа. 1949.
3. І. Юхновський, М. Козловський. І. Пилюк. Мікроскопічна теорія фазових переходів у тривимірних системах. – Львів: Євросвіт, 2001.
4. Різак В.М., Різак І.М., Рудавський Е.Я. Кріогенна фізика і техніка. Київ, “Наукова думка”, 2006.

#### **10. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**