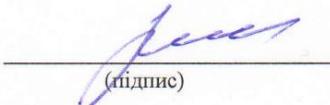


Додаток до робочої програми навчальної дисципліни  
**«Мезоскопічна фізика»**  
(назва дисципліни)

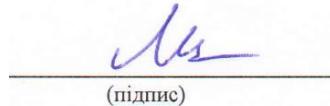
Дію робочої програми продовжено: на 2022/2023 н. р.

Заступник декана фізичного факультету з навчальної роботи

  
\_\_\_\_\_  
Рохмістрів Д.В.  
(прізвище, ініціали)

«30» 08 2022 р.

Голова науково-методичної комісії \_\_\_\_\_ факультету

  
\_\_\_\_\_  
Макаровський М.О.  
(прізвище, ініціали)

«30» 08 2022 р.

Додаток до робочої програми навчальної дисципліни

**Спеціальний курс «Мезоскопічна фізика»**  
(назва дисципліни)

Дію робочої програми продовжено: на 2021/2022 н. р.

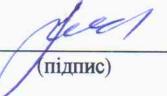
Заступник декана фізичного факультету з навчальної роботи

  
(підпис)

**Рохмістров Д.В.**  
(прізвище, ініціали)

«30» 08 2021 р.

Голова науково-методичної комісії фізичного факультету

  
(підпис)

**Макаровський М.О.**  
(прізвище, ініціали)

«30» 08 2021 р.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшица



Робоча програма навчальної дисципліни

**Мезоскопічна фізика**

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти магістр  
галузь знань 10 Природничі науки  
(шифр і назва)  
спеціальність 104 – Фізика та астрономія  
(шифр і назва)  
освітня програма Освітньо-наукова програма “Фізика”  
(шифр і назва)  
спеціалізація “Фізика”  
(шифр і назва)  
вид дисципліни за вибором  
(обов'язкова / за вибором)  
факультет фізичний

20\_20 / 20\_21 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченю радою фізичного факультету .

“28” серпня 2020 року, протокол № 5

**РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:**

**Кріве Ілля Валентинович, доктор фіз-мат. наук, професор.**

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

Протокол від “ 24 ” 06 2020 року № 10

Завідувач кафедри теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця



Рашба Г.І.

(прізвище та ініціали)

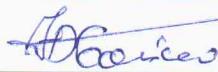
Програму погоджено з гарантом освітньої програми

фізика (спеціальність 104 – фізика та астрономія)

назва освітньої програми

Гарант освітньої-наукової програми

(керівник проектної групи) Бойко Ю.І.



Бойко Ю.І.

(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 25 ” 06 2020 року № 10

Голова методичної комісії фізичного факультету



Макаровський М.О..

(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “**Мезоскопічна фізика**” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки другого рівню вищої освіти – магістр

спеціальності (напряму) – 104 – «фізика та астрономія»

освітньо-наукова програма – фізика

### **1. Опис навчальної дисципліни**

#### **1.1. Мета викладання навчальної дисципліни**

Метою викладання навчальної дисципліни «Мезоскопічна фізика» є ознайомлення студентів з сучасними проблемами мезоскопічної фізики та створення у них уявлень стосовно того, як побудувати квантову теорію ансамблю невпорядкованих малих систем, які знаходяться в однаковому макроскопічному стані, але відрізняються реалізацією невпорядкованості (концепція «домішкового ансамблю»).

**1.2. Основні завдання вивчення дисципліни «Мезоскопічна фізика» є навчити студентів:**

- досліджувати фізичні явища у мезоскопічних системах,
- використовувати поняття та методи квантової механіки з метою дослідження мезоскопічних явищ,
- використовувати поняття кубітів при дослідженнях систем у змішаних станах,
- знати, як реалізуються квантові точки у двовимірному електронному газі,
- володіти технікою теоретичного дослідження транспорту електронів і термоелектричних ефектів,
- досліджувати явище резонансного тунелювання у мезоскопічних системах,
- вміти розраховувати фізичні характеристики квантових точок в умовах кулонівської блокади.

**1.3. Кількість кредитів – 5.**

**1.4. Загальна кількість годин – 150.**

<b>1.5. Характеристика навчальної дисципліни</b>
За вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
1-й
Семестр
2-й
Лекції
24 год.
Практичні, семінарські заняття
12 год.
Лабораторні заняття
Не передбачені навчальним планом
Самостійна робота
114 год.
Індивідуальні завдання
Не передбачені навчальним планом
<b>Екзамен</b>

### 1.6. Заплановані результати навчання

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

Знати, розуміти та бути здатним застосовувати на професійному рівні принципи і підходи до опису сукупність фізичних явищ, які спостерігаються у тілах скінченних розмірів, що містять мікроскопічні неоднорідності, які пов'язані з неусередненістю властивостей тіл за різними реалізаціями випадкових неоднорідностей.

Бути здатним застосовувати математичні знання з квантової механіки, теорії ймовірностей та математичної статистики з метою отримання фізичних характеристик мезоскопічних систем таким чином, щоб на основі відомих властивостей окремих частинок та їх взаємодії, вміти розраховувати фізичні характеристики мезоскопічних систем.

## **2. тематичний план навчальної дисципліни**

### **Розділ 1. Квантова механіка – основа мезоскопічної фізики. Квантові обчислення – кубіти. (теми 1-3)**

#### **Тема 1. Вступ.**

Що таке мезоскопічна фізика? Квантова когерентність. Декогеренція квантових систем. Довжина збою фази та її залежність від температури. Балістичний та дифузний транспорт.

#### **Тема 2. Основні постулати квантової механіки.**

Рівняння Шредінгера. Інтеграли по траекторіях. Вектор стану системи і різні зображення хвильової функції. Часова динаміка квантової системи: зображення Шредінгера і Гейзенберга. Рівняння Гейзенберга.

#### **Тема 3. Кубіти і квантові обчислення.**

Що таке кубіт (qubit)? Перетворення кубіту. Матриця однокубітних перетворень. Перетворення Адамара. Двокубітові системи. Переплутаність (entanglement). Ентропія переплутаності (ентропія фон Неймана). Максимально переплутані двокубітові стани (стани Белла). Квантова телепортaciя.

### **Розділ 2. Транспорт, термоелектричні та флюктуаційні явища у мезоскопіці. (теми 4-6)**

#### **Тема 4. Когерентний транспорт електронів, які не взаємодіють.**

Виведення формул Ландауера. Квант кондактансу. Двовимірні квантові точкові контакти. Квантування кондактансу в квантових точкових контактах у двовимірному електронному газі.

#### **Тема 5. Термоелектричні ефекти.**

Матриця кінетичних коефіцієнтів. Співвідношення Онзагера. Термо-е.р.с. і термокондактанс (формули Сівана-Ірмі і формула Мотта). Квантування теплокондактансу. Універсальність кванту теплокондактансу.

#### **Тема 6. Флюктуації струму і шуми в квантових системах.**

Термічні шуми. Дробовий шум (shot noise). Загальна формула для інтенсивності шуму. Формула Джонсона-Найквіста і формула Шотткі. Статистика шумів (Full Counting Statistics).

### **Розділ 3. S-матриця, T-матриця та кондактанс. (теми 7-8)**

#### **Тема 7. S-матриця і T-матриця.**

Властивості S-матриці. Загальний вигляд S-матриці одноканального розсіяння. «Y-junction». Параметрізація Азбеля-Бюттікера-Ірмі для S-матриці. Трансфер матриця для одноканального розсіяння. Властивості трансфер матриці.

#### **Тема 8. Резонансне розсіяння.**

Вивід формули Брейта-Вігнера методом трансфер-матриці. Резонансне тунелювання. Температурна залежність кондуктансу при резонансному тунелюванні.

## Розділ 4. Мезоскопічні явища у квазіодновимірних системах (теми 9-13)

## Тема 9. Кулонівська блокада.

Що таке «кулонівська блокада». Енергія «зарядки»  $E_c$ . Одноелектронні транзистори. Осциляції кондактансу в одно електронних транзисторах. Однорівневі квантові доти. Рівняння балансу (“master equation”) і вираз для струму при послідовному тунелюванні електронів через квантовий дот.

## Тема 10. «Золоте правило» Фермі і обчислення ймовірностей переходів електронів в квантових «лотах».

Тунельний гамільтоніан. Обчислення ймовірностей тунельних процесів в найнижчому порядку по прозорості тунельного бар'єру. Когерентний та некогерентний транспорт електронів через квантові точки. Послідовне тунелювання, “cotunneling” та Кондо-резонанс. Температурна залежність кондактанса в умовах Кондо-резонансу.

## Тема 11. Електрон-фононна взаємодія в квантових точках.

Одномолекулярні транзистори. HOMO і LUMO рівні. Непружнє тунелювання. Гамільтоніан електрон-вібронної взаємодії. Унітарне перетворення Ланга-Фірсова. Поляронна блокада. Унітарність та зняття блокади Франка-Кондора при високій температурі.

## Тема 12. Персистентний струм в квантових кільцях.

Перsistентний струм у надпровідних і нормальніх системах. Розрахунок амплітуди перsistентного струму при нульовій температурі. Ефект парності. Формула Куліка для перsistентного струму у металевих кільцях. Залежність амплітуди від температури. Перsistентний струм в діелектричних кільцях. Вплив домішок на перsistентний струм.

## Тема 13. Ефект Казиміра.

Енергія нульових коливань. Ферміони і бозони. Розрахунок сили Казиміра для квантових флуктацій фононних полів в скінченній одновимірній системі. Скінченні температури. Метод аналітичної регуляризації. Енергія Казиміра.

### **3. Структура навчальної дисципліни**

Тема 7.	13	2	1			10
Тема 8.	13	2	1			10
<b>Разом за розділом 3.</b>	<b>26</b>	<b>4</b>	<b>2</b>			<b>20</b>
<b>Розділ 4. Мезоскопічні явища у квазіодновимірних системах</b>						
Тема 9.	12	2	1			9
Тема 10.	12	2	1			9
Тема 11.	12	2	1			9
Тема 12.	12	2	1			9
Тема 13.	12	2				10
<b>Разом за розділом 4.</b>	<b>60</b>	<b>10</b>	<b>4</b>			<b>46</b>
<b>Усього годин</b>	<b>150</b>	<b>24</b>	<b>12</b>			<b>114</b>

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

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Декогеренція квантових систем. Розрахунки довжини збою фази та її залежності від температури.	1
2	Часова динаміка квантової системи: зображення Шредінгера і Гейзенберга. Рівняння Гейзенберга.	1
3	Переплутані двокубітні стани	1
4	Двовимірні квантові точкові контакти.	1
5	Матриця кінетичних коефіцієнтів. Доведення піввідношення Онзагера.	1
6	Загальна формула для інтенсивності шуму. Формула Джонсона-Найквіста і формула Шотткі.	1
7	Властивості S-матриці.	1
8	Властивості трансфер-матриці	1
9	Осциляції кондактансу в одноелектронних транзисторах.	1
10	Обчислення ймовірностей тунельних процесів в найнижчому порядку по прозорості тунельного бар'єру.	1
11	Непружне тунелювання.	1
12	Розрахунок амплітуди персистентного струму при нульовій температурі	1
	<b>Разом</b>	<b>12</b>

#### 5. Завдання для самостійної роботи

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

1. По всім нижче вказаним темам опрацювати конспекти лекцій, прочитати відповідні параграфи в підручниках [1–4] та на відповідних інтернет-ресурсах.
2. Самостійно виконувати домашні завдання по відповідним темам.
3. Самостійно підготуватися для практичних занять та до контрольних робіт.

	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
	1	2
1	Квантова когерентність. Декогеренція квантових систем. Довжина збою фази та її залежність від температури. Балістичний та дифузний транспорт.	8

2	Теорія представлень. Інтеграли по траєкторіях. Вектор стану системи і різні представлення хвильової функції. Часова динаміка квантової системи: представлення Шредінгера і Гейзенберга. Рівняння Гейзенберга.	8
3	Поняття біта та квантового біта. Перетворення кубіту. Матриця однокубітних перетворень. Перетворення Адамара. Двокубітові системи. Переплутаність (entanglement). Ентропія переплутаності (ентропія фон Неймана). Максимально переплутані двокубітові стани (стани Белла). Квантова телепортация.	8
4	Когерентний транспорт електронів, які не взаємодіють. Вивід формулі Ландауера. Квант кондактансу. Двовимірні квантові точкові контакти. Квантування кондактансу в квантових точкових контактах у двовимірному електронному газі.	8
5	Термоелектричні ефекти. Співвідношення Онзагера для кінетичних коефіцієнтів. Формули Сівана-Ірмі і формула Мотта. Квантування теплокондактансу. Квант теплокондактансу.	8
6	Флуктуації струму і шуми в квантових системах. Загальна формула для інтенсивності шуму. Формула Джонсона-Найквіста і формула Шоттки.	8
7	Матриця розсіяння і трансфер матриця. Трансфер матриця для одноканального розсіяння. Властивості трансфер матриці.	10
8	Резонансне розсіяння. Розгляд виводу формулі Бретта-Вігнера методом трансфер-матриці. Поняття резонансного тунелювання. Температурна залежність кондуктансу при резонансному тунелюванні.	10
9	Кулонівська блокада. Одноелектронні транзистори. Осциляції кондактансу в одноелектронних транзисторах. Однорівневі квантові доти. Рівняння балансу ("master equation") і вираз для струму при послідовному тунелюванні електронів через квантовий дот.	9
10	Тунельний гамільтоніан. Обчислення ймовірностей тунельних процесів в найнижчому порядку по прозорості тунельного бар'єру. Когерентний та некогерентний транспорт електронів через квантові точки. Послідовне тунелювання, "cotunneling" та Кондорезонанс. Температурна залежність кондактанса в умовах Кондорезонансу.	9
11	Одномолекулярні транзистори. HOMO і LUMO рівні. Непружнє тунелювання. Гамільтоніан електрон-вібронної взаємодії. Унітарне перетворення Ланга-Фірсова. Поляронна блокада. Унітарність та зняття блокади Франка-Кондора при високій температурі.	9
12	Вивід формулі Куліка для персистентного струму у металевих кільцях. Залежність амплітуди від температури. Персистентний струм в діелектричних кільцях. Вплив домішок на персистентний струм.	9
13	Ефект Казиміра. Нулюві коливання. Розрахунок сили Казиміра для квантових флуктуацій фононних полів в скінченній одновимірній системі. Скінченні температури. Метод аналітичної регуляризації. Енергія Казиміра.	10
<b>Разом</b>		<b>114</b>

## 6. Індивідуальні завдання

Не передбачені навчальним планом.

## 7. Методи контролю

Поточне опитування, перевірка домашніх завдань, дві контрольні роботи за основними розділами, екзамен.

## 8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання						Екзамен	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Розділ 1	Розділ 2	2 контрольні роботи, передбачені навчальним планом	Разом		
T1-T3	T4-T6	T7-T8	T9-T13				
10	10	10	10	10+10	60	40	100

Для зарахування розділу треба домашні завдання та отримати за кожний розділ не менше 5 балів, написати контрольну роботу за розділами 1-2, та за розділами 3-4, набрати за кожну з двох контрольних робіт не менше 5 балів. В підсумку треба набрати для допуску до екзамену не менше 30 балів.

### Критерії оцінювання письмової екзаменаційної роботи

Екзаменаційний білет складається з трьох теоретичних питань. Кожне питання оцінюється в 20 балів. У відповіді на теоретичні питання студент повинен продемонструвати знання теорії навчальної дисципліни «Фізична кінетика» та її понятійно-категоріального апарату, термінології, понять і принципів предметної області дисципліни.

Максимальні бали виставляються в разі чіткої, логічної, послідовної відповіді на поставлене питання, з виводами основних формул, формулюванням фізичних законів

У процесі оцінювання теоретичних завдань екзаменаційного білету враховуються:

- повнота розкриття питання (4 бали);
- уміння чітко формулювати визначення фізичних понять, термінів та пояснювати їх (4 бали);
- здатність аргументувати отриману відповідь (4 бали);
- здатність робити аналітичні міркування, порівняння, формулювання висновків (4 бали);
- логічна послідовність викладення матеріалу у відповіді на завдання (4 бали).

Відповідь має бути обґрунтованою, з посиланням на відповідні фізичні закони та рівняння, з послідовними розрахунками всіх основних формул, доведеними до кінцевого результату з чіткою відповіддю на поставлене питання. За рішення задачі (практичного завдання) нараховуються такі бали:

1. Повна та послідовно обґрунтована відповідь отримує оцінку 20 балів у випадку, коли студент отримав правильну відповідь і продемонстрував метод і спосіб її отримання.
2. Оцінка 12-19 балів виставляється за відповідь, в якій є несуттєві похибки в логіці викладу,
3. Відповідь на питання отримує оцінку 7-11 балів, коли студент не отримав правильну відповідь або написав тільки кінцеву формулу без пояснень та виводу.
4. Відповідь на питання отримує оцінку 0-10 балів, коли студент не отримав

правильну відповідь, причому метод і спосіб розв'язання завдання були не вірними.

**Екзамен зданий, якщо сумарна оцінка за письмову екзаменаційну роботу не менше 20 балів, а сумарний підсумковий бал не менше 50 балів.**

### Шкала оцінювання

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

## 9. Рекомендована література Основна література

1. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику. Пер. с англ. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304с.

### Допоміжна література

1. Datta S. Electronic Transport in Mesoscopic Systems. – Cambridge University Press. – 1995. -377P.
2. "Mesoscopic Electron Transport" edited by L. P. Kouwenhoven, G. Schoen, and L. L. Sohn, NATO ASI Series E (Kluwer Academic Publishing, Dordrecht) Посилання на електронне джерело: <http://www.physics.drexel.edu/~goran/nano/references/QD/ElectronTransportQD.pdf>
3. Weinmann D. The Physics of Mesoscopic Systems. Посилання на електронне джерело: <http://www-ipcms.u-strasbg.fr/IMG/pdf/petra.pdf>

## Інформаційні ресурси

1. Учбові матеріали на сайті 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_study Ukr.html)  
[http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students\\_ref Ukr.html](http://kaf-theor-phys.univer.kharkov.ua/ukrainian/for%20students_ref Ukr.html)
2. Відеолекції та відкриті освітні матеріали МФТІ  
<http://lectoriy.mipt.ru/course/viewall/>