

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор
з науково-педагогічної роботи

« ____ » _____ 20 р.

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 _____

2020 / 2021 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

“ 28 ” 08 2020 року, протокол № 5

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Криве Ілля Валентинович, доктор фіз-мат. наук, професор.

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

Протокол від “24” 06 2028 року, № 10

Завідувач кафедри теоретичної фізики академіка. М. Ліфшиця

_____ (Рашба Г.І.)
(підпис) (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.
(підпис) (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 неупорядкованих малих систем, які знаходяться в однаковому макроскопічному стані, але відрізняються реалізацією неупорядкованості (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.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
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
Екзамен

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 сукупності 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. Інтеграл по траєкторіях. 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 телепортація.

Розділ 2. Транспорт, термоелектричні та флуктуаційні явища у мезоскопиці. (теми 4-6)

Тема 4. Когерентний транспорт електронів, які не взаємодіють.

Виведення формули 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. Флуктуації 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». Параметризація 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 кондуктансу 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 «дотах».

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 кондуктанса в умовах Кондо-резонансу.

Тема 11. Електрон-фононна взаємодія в квантових точках.

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

Тема 12. Персистентний струм в квантових кільцях.

Персистентний струм у надпровідних і нормальних системах. Розрахунок амплітуди персистентного струму при нульовій температурі. Ефект парності. Формула Куліка для персистентного струму у металевих кільцях. Залежність амплітуди від температури. Персистентний струм в діелектричних кільцях. Вплив домішок на персистентний 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

Назви модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
л		п	лаб	інд	с.р	
1	2	3	4	5	6	7
9 семестр						
Розділ 1. Квантова механіка – основа мезоскопічної фізики. Квантові обчислення – кубіти.						
Тема 1.	10	1	1			8
Тема 2.	11	2	1			8
Тема 3.	11	2	1			8
Разом за розділом 1.	32	5	3			24
Розділ 2. Транспорт, термоелектричні та флуктуаційні явища у мезоскопиці.						
Тема 4.	10	1	1			8
Тема 5.	11	2	1			8
Тема 6.	11	2	1			8
Разом за розділом 2.	32	5	3			24
Розділ 3. S-матриця, T-матриця та кондуктанс.						

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

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 Шредингера 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 одно електронних 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
	Разом	12

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. Інтеграл 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 телепортація.	8
4	Когерентний транспорт електронів, які не взаємодіють. Вивід формули 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 формули Брейта-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. НОМО і LUMO рівні. Непружне тунелювання. Гамільтоніан електрон-вібронаї взаємодії. Унітарне перетворення Ланга-Фірсова. Поляронна блокада. Унітарність та зняття блокади Франка-Кондора при високій температурі.	9
12	Вивід формули 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. Нульові коливання. Розрахунок сили Казиміра для квантових флуктацій фононних полів в скінченній одновимірній системі. Скінченні температури. Метод аналітичної регуляризації. Енергія Казиміра.	10
	Разом	114

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 висновками 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	зараховано
70-89	добре	
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. Weinnmann 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_ref_ukr.html
2. Відеолекції та відкриті освітні матеріали МФТІ
<http://lectoriy.mipt.ru/course/viewall/>