

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**

_____ р.
« _____ » _____

Робоча програма навчальної дисципліни

Теорія низьковимірних систем

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти _____ бакалавр _____

галузь знань _____ 10 Природничі науки _____
(шифр і назва)

спеціальність _____ 104 – Фізика та астрономія _____
(шифр і назва)

освітня програма _____ “Фізика” _____
(шифр і назва)

спеціалізація _____
(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 ” серпня 2020 року, протокол № 5

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

**Філь Дмитро Вячеславович, доктор фіз-мат. наук, с.н.с., професор кафедри,
Єзерська Олена Володимирівна, канд. фіз.-мат. наук, доцент**

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

Протокол від “24” червня 2020 року протокол № 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 ” червня 2020 року № 10

Голова методичної комісії _____

Макаровський М.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “Теорія низьковимірних систем” складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки першого рівню вищої освіти – бакалавр

спеціальності (напряму) 104 – фізика та астрономія спеціалізації

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «теорія низьковимірних систем» є надання студентам уявлень про сучасні стан теорії двовимірного електронного газу в магнітному полі, теорії двовимірних кристалів, теорії топологічних ізоляторів, і теорії двовимірної надплинної рідини, про основні моделі в теорії низьковимірних магнетизму та їх точні й наближені методи розв’язування.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

- навчити студентів основам квантової теорії низьковимірних систем і теорії фазових перетворень в таких системах,

- надати студентам уявлення про сучасні "гарячі точки" і сучасну проблематику теорії низьковимірних систем.

1.3. Кількість кредитів – 4.

1.4. Загальна кількість годин – 120.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни
За вибором
Денна форма навчання
Рік підготовки
4-й
Семестр
8-й
Лекції
26 год.
Практичні, семінарські заняття
26 год.
Лабораторні заняття
Не передбачені навчальним планом
Самостійна робота
68 год. (В тому числі 10 год. на підготовку до двох контрольних роботи)
Індивідуальні завдання
Не передбачені навчальним планом
Екзамен

1.6. Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких результатів навчання:

Знати, розуміти та бути здатним застосовувати на професійному рівні принципи і теоретичні підходи до опису аналізу, тлумачення, пояснення і класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів, які відбуваються у низьковимірних системах.

Бути здатним застосовувати математичні знання з теорії лінійних операторів, теорії ймовірностей та математичної статистики з метою отримання фізичних характеристик

низьковимірних систем, використовувати симетрійні і топологічні принципи в аналізі фізичних явищ в низьковимірних системах, зокрема в низьковимірних магнітних системах.

2. тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Двовимірний електронний газ в магнітному полі.

Тема 1. Двовимірний електронний газ. Квантовий ефект Холла.

Прямокутні і трикутні квантові ями. Гетероструктури з квантовими ямами. Спектр двовимірного електронного газу в магнітному полі. Класичний і квантовий ефект Холла. Роль локалізованих станів. Крайові стани в системах з квантовим ефектом Холла.

Тема 2. Фаза Беррі

Загальне визначення фази Беррі. Фаза Беррі для спину в магнітному полі. Ефект Ааронова-Бома і фаза Беррі. Штучні калібрувальні поля і фаза Беррі

Тема 3. Топологічні інваріанти в теорії квантового ефекту Холла

Холловська провідність, розрахунок в наближенні лінійного відгуку. Число Черна. ТКНН - інваріант.

Розділ 2. Електронні властивості графену.

Тема 4. Електронний спектр графену в моделі сильного зв'язку.

Кристалічна структура графену. Зона Бріллюэна. Електронний спектр. Діраківські точки. Рівні Ландау в графені. Тунелювання Клейна в графені

Тема 5. Теорія лінійного відгуку графену на зовнішні поля

Високочастотна провідність графену. Поглинання електромагнітного поля в графені. Поверхневі плазмони в графені.

Розділ 3. Основи теорії топологічних ізоляторів.

Тема 6. Симетрія гамільтоніану електронів на решітці відносно обернення часу

Симетрія відносно обернення часу для бесспінових частинок. Симетрія відносно обернення часу для частинок зі спіном. Теорема Крамера.

Тема 7. Моделі двовимірних топологічних ізоляторів

Модель Халдейна і модель Кейна-Меле. Гетероструктура HgTe-CdTe як двовимірний топологічний ізолятор: модельний опис. Балістичний транспорт в одновимірних каналах.

Тема 8. Z_2 топологічний інваріант

Z_2 топологічний інваріант і нулі Пфаффіану. Z_2 топологічний інваріант в системах з центром інверсії

Тема 9. Тривимірні топологічні ізолятори

Сильні і слабкі тривимірні топологічні ізолятори. Поверхневі стани тривимірних топологічних ізоляторів.

Розділ 4. Перетворення Березинського-Костерліца-Таулеса.

Тема 10. Особливості фазових перетворень в двовимірних системах

Бозе-конденсація в тривимірній і двовимірних системах. Відсутність далекого порядку в двовимірних системах.

Тема 11. Вихрі в надплинних системах. Взаємодія вихрів

Квантові вихрі. Загасання надплинного потоку в системі в квантовими вихорами. Вільна енергія системи вихорів. Температура переходу Березинського-Костерліца-Таулеса.

Тема 12. Надплинна щільність і перехід Березинського-Костерліца-Таулеса.

Енергія взаємодії вихорів в двовимірній надплинній системі. Зменшення надплинної щільності за рахунок нормальних збуджень і за рахунок вихорів. Стрибок надплинної щільності в точці переходу Березинського-Костерліца-Таулеса.

Розділ 5. Спінові моделі. Точні та наближені методи в теорії низьковимірного магнетизму

Тема 13. Гамільтоніан Гейзенберга.

Основний стан гейзенберговського ферромагнетика. Спінова хвиля. Спектр найнижчих станів гейзенберговського ферромагнетика.

Тема 14. Одновимірний замкнений ланцюжок в ізотропній моделі Гейзенберга.

Метод Бете рішення одномірної задачі ($s = 1/2$). Енергія основного стану гейзенберговського антиферромагнетика.

Тема 15. Анізотропний ланцюжок Гейзенберга зі спіном $1/2$ як точно розв'язувана квантова модель.

Квантовий метод зворотної задачі розсіювання.

Тема 16. Точно розв'язувана одномірна XY-модель зі спіном $1/2$.

Термодинаміка XY-моделі. Квантовий фазовий перехід по полю в ізотропній XY-моделі при $T = 0$.

Тема 17. Двовимірна ґратка Ізінга.

Матриця переходу. Зведення задачі до одновимірної XY-моделі. Точне рішення для двовимірної моделі Ізінга без магнітного поля.

Тема 18. Рівняння руху спина в магнітному полі. Прецесія.

Лінеаризація рівнянь руху. Напівкласична теорія спінових хвиль у ферромагнетикі.

Напівкласична теорія спінових хвиль в антиферромагнетикі. Випадок лінійного ланцюжка.

Тема 19. Модель Хаббарда.

Точний розв'язок для одновимірної моделі методом Бете.

Тема 20. Проблема Кондо.

Точний розв'язок методом Бете.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Двовимірний електронний газ в магнітному полі.						
Тема 1. Двовимірний електронний газ. Квантовий ефект Холла.	8	1	3			4
Тема 2. Фаза Беррі	8	1	3		1	3
Тема 3. Топологічні інваріанти в теорії квантового ефекту Холла	8	1	3			4
Разом за розділом 1	24	3	9		1	11
Розділ 2. Електронні властивості графену.						
Тема 4. Електронний спектр графену в моделі сильного зв'язку.	8	1	3			4
Тема 5. Теорія лінійного відгуку графену на зовнішні поля.	6	2				4
Разом за розділом 2	14	3	3			8
Розділ 3. Основи теорії топологічних ізоляторів.						
Тема 6. Симетрія гамільтоніану електронів на решітці відносно обернення часу	6	2				4

Тема 7. Моделі двовимірних топологічних ізоляторів	8	1	3			4
Тема 8. Z_2 топологічний інваріант	6	1	1			4
Тема 9. Тривимірні топологічні ізолятори	6	1	1			4
Разом за розділом 3	26	5	5			16
Розділ 4. Перетворення Березинського-Костерліца-Таулеса.						
Тема 10. Особливості фазових перетворень в двовимірних системах.	6	1	1		2	2
Тема 11. Вихорі в надплинних системах. Взаємодія вихорів.	6	1	1			4
Тема 12. Надплинна щільність і перехід Березинського-Костерліца-Таулеса.	6	1	1			4
Разом за розділом 4	18	3	3		2	10
Розділ 5. Спінові моделі. Точні та наближені методи в теорії низьковимірного магнетизму						
Тема 13. Одновимірна модель Ізінга	5	1			2	2
Тема 14. Одновимірний замкнений ланцюжок в ізотропній моделі Гейзенберга.	6	1	1		1	3
Тема 15. Анізотропний ланцюжок Гейзенберга зі спіном $\frac{1}{2}$ як точно розв'язувана квантова модель.	7	2	1		2	2
Тема 16. Низькотемпературна термодинаміка ізотропної моделі Гейзенберга в наближенні спінових хвиль.	7	2	2		2	2
Тема 17. Точно розв'язувана одновимірна XY-модель зі спіном $1/2$.	2	1	2		2	2
Тема 18. Рівняння руху спина в магнітному полі. Прецесія.	2	1				
Тема 19. Модель Хаббарда	6	1				4
Тема 20. Проблема Кондо.	3	2				
Разом за розділом 5	38	12	6		7	13
Усього годин	120	26	26		10	58

4. Теми практичних занять (семінарів).

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Крайові стани в системах з квантовим ефектом Холла	3
2	Ефект Ааронова-Бома і фаза Беррі	3
3	Штучні калібрувальні поля і фаза Беррі	3
4	Тунелювання Клейна в графені	3
5	Балістичний транспорт в одновимірних каналах.	3
6	Гетероструктура HgTe-CdTe як двовимірний топологічний ізолятор: модельний опис.	1

7	Тривимірні топологічні ізолятори	1
8	Про основні особливості фазових перетворень в двовимірних системах.	1
9	Взаємодія вихорів в надплинних системах.	1
10	Надплинна щільність і перехід Березінського-Костерліца-Таулеса.	1
11	Одновимірний замкнений ланцюжок в ізотропній моделі Гейзенберга. Основний стан, стани з одним та двома перевернутими спінами. Зв'язані стани – спінові комплекси	1
12	Спінові моделі: перехід від спінових операторів до операторів народження та знищення (бозе оператори та фермі оператори). Розрахунки намагніченості та теплоємності для ізотропної моделі Гейзенберга в наближенні спінових хвиль.	1
13	Термодинаміка моделі Гейзенберга в наближенні спінових хвиль	2
14	Термодинаміка XY та XX моделі. Квантовий фазовий перехід по полю в польовій залежності намагніченості при $T=0$ для XX моделі	2
	Усього годин	26

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 та монографіях;
2. Самостійно готуватися до практичних занять;
3. Самостійно підготуватися до двох контрольних робіт.

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість Годин
1	Двовимірний електронний газ. Квантовий ефект Холла.	4
2	Фаза Беррі	4
3	Топологічні інваріанти в теорії квантового ефекту Холла	4
4	Електронний спектр графену в моделі сильного зв'язку.	4
5	Теорія лінійного відгуку графену на зовнішні поля.	4
6	Симетрія гамільтоніану електронів на решітці відносно обернення часу	4
7	Моделі двовимірних топологічних ізоляторів	4
8	Z_2 топологічний інваріант	4
9	Тривимірні топологічні ізолятори	4
10	Особливості фазових перетворень в двовимірних системах.	4
11	Вихорі в надплинних системах. Взаємодія вихорів.	4
12	Надплинна щільність і перехід Березінського-Костерліца-Таулеса.	4
13	Одновимірна модель Ізінга. Термодинаміка одновимірної моделі Ізінга. Дослідити температурну залежність теплоємності від температури в нульовому магнітному полі. Порівняти з результатом для простого парамагнетика.	4
14	Гамільтоніан Гейзенберга. Спектр найнижчих станів гейзенберговського ферромагнетика. Для ланцюжка зі спіном ($s = 1/2$) у разі одновісної анізотропії знайти спектр стаціонарних	4

	станів з одним оберненим спінів для циклічних граничних умов та для «відкритого» ланцюжка.	
15	Метод Бете рішення одномірної задачі ($s = 1/2$). Методом Бете знайти спектр стаціонарних станів з двома оберненими спінами для нескінченного ланцюжка.	4
16	Диагоналізація гамільтоніану ХУ-моделі за допомогою u-v-перетворення Боголюбова. Дослідити залежність теплоємності від температури в різних магнітних полях.	4
17	Модель Хаббарда. Проаналізувати види симетрії в моделі Хаббарда.	4
	Усього годин	68

6. Індивідуальні завдання

Не передбачено навчальним планом.

7. Методи контролю

Підготовка письмової доповіді для виступу на семінарі, виступ на семінарі, контрольна робота, залік.

8. Схема нарахування балів

				Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання	Екзамен	Сума
Розділи 1-5 (Т1-Т20)			Разом			
Поточне опитування	Письмова доповідь	Виступ з доповіддю на практичному занятті	Контрольна робота (2 к.р.)			
10	10	20	10+10	60	40	100

Для зарахування розділів 1-5 треба набрати у підсумку не менше 5 балів за результатами поточного опитування та участі у практичних заняттях за кожний з розділів. Треба представити письмову доповідь для виступу на практичному занятті й набрати за неї не менше 5 балів. Виступити з усною доповіддю на практичному занятті та набрати за виступ не менше 10 балів. Для зарахування кожної з двох контрольних робіт треба набрати у підсумку не менше 15 балів за кожну, та загалом не менше 10 балів. Для допуску до письмового екзамену треба набрати у підсумку не менше 30 балів. За екзаменаційну письмову роботу студент повинен набрати не менше 20 балів та загалом не менше 50 балів.

Критерії оцінювання письмової екзаменаційної роботи

Екзаменаційний білет складається з трьох теоретичних питань: 1-е й 2-е – по розділах 1-4 та 3-є питання – по розділу 5.

У відповіді на теоретичне питання студент повинен продемонструвати знання теорії навчальної дисципліни «Теорія низьковимірних систем» 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 (2 бали);

- уміння чітко формулювати визначення фізичних понять, термінів та пояснювати їх (2 бали);
- здатність аргументувати отриману відповідь (2 бали);
- здатність робити аналітичні міркування, порівняння, формулювання висновків (2 бали);
- логічна послідовність викладення матеріалу у відповіді на завдання (2 бали).

Рішення задач повинні бути обґрунтованими, з посиланням на відповідні фізичні закони та рівняння, які застосовуються при рішенні, з послідовними розрахунками всіх основних формул, доведеним до кінцевого результату з чіткою відповіддю на поставлене питання. За рішення задачі (практичного завдання) нараховуються такі бали:

1. Завдання розв'язано на оцінку 10 балів у випадку, коли студент отримав правильну відповідь і продемонстрував метод і спосіб її отримання.
2. Завдання розв'язано на оцінку 8-9 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, але продемонстрував вірний метод і спосіб її отримання.
3. Завдання розв'язано частково на оцінку 5-7 балів, коли студент не отримав правильну відповідь, але частково розв'язав задачу та отримав деякі проміжні результати.
4. Завдання розв'язано на оцінку 0-4 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 за національною шкалою	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Рекомендована література

Основна література

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц (Л.П.Питаевский). Курс теоретической физики Наука, Москва, т 3.Квантовая механика. 1989; т.5. Статистическая физика, 1976; т.9. Статистическая физика, Часть 2. 1978.
2. Mikhail I. Katsnelson, “Graphene. Carbon in two dimensions”, Cambridge university press, Cambridge, 2012.
3. B. Andrei Bernevig with Taylor L. Hughes, “Topological insulators and topological superconductors”, Princeton university press, Princeton and Oxford, 2013.
4. Shun-Qing Shen. Topological Insulators Dirac Equation in Condensed Matters, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
5. P.M.Chaikin, T.S.Lubensky. Principles of condensed matter physics. Cambridge University Press 1995.

6. Маттис Д. Теория магнетизма
7. Ахиезер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны
8. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма
9. Смарт Дж. Эффективное поле в теории магнетизма
10. Изюмов Ю.А., Скрыбин Ю.Н. Статистическая механика магнитоупорядоченных систем.

Допоміжна література

1. J. H. Davies The physics of low dimensional semiconductors. Cambridge University Press, 1998.
2. S.M.Girvin The Quantum Hall Effect: Novel Excitations and Broken Symmetries <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9907002>.
3. G. Tkachov, Topological Insulators The Physics of Spin Helicity in Quantum Transport Grigory Tkachov Pan Stanford Publishing . 2016.
4. B. I. Halperin Quantized Hall conductance, current-carrying edge states, and the existence of extended states in a two-dimensional disordered potential Phys. Rev. B 25, 2185 (1982)
5. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim: The electronic properties of graphene, Review of Modern Physics. **81**, 109 (2009).
6. M. Z. Hasan, C. L. Kane. Topological Insulators, Review of Modern Physics **82**, 3045 (2010).
7. J. Dalibard, F. Gerbier, G. Juzeliunas, Patrik Ohberg Artificial gauge potentials for neutral atoms, Review of Modern Physics **83**, 1523 (2011).
8. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления
9. Р.Бэкстер. Точно решаемые модели в статистической механике
10. Боголюбов Н.М., Изергин А.Г., Корепин В.Е. Корреляционные функции интегрируемых систем и квантовый метод обратной задачи

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

1. Учебні 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. Конспект лекцій нобелівського лауреата А.Леггетта "Physics in Two Dimensions" в університеті Іллінойсу

<https://courses.physics.illinois.edu/phys598PTD/fa2013>