

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра теоретичної фізики імені академіка І.М.Ліфшиця

**“ЗАТВЕРДЖУЮ”**

Перший проректор

\_\_\_\_\_

“\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Робоча програма навчальної дисципліни

теорія низьковимірних систем

(назва навчальної дисципліни)

спеціальність (напрямок) \_\_\_\_\_ 104 - фізика та астрономія \_\_\_\_\_

спеціалізація \_\_\_\_\_ фізика \_\_\_\_\_

факультет \_\_\_\_\_ фізичний \_\_\_\_\_

2016\_\_ / 2017\_\_ навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою факультету (інституту, центру)

“ 29 ” серпня 2016 року, протокол № 9

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

**Філь Дмитро Вячеславович, доктор фіз-мат. наук, с.н.с., професор кафедри**

Програму схвалено на засіданні кафедри

теоретичної фізики імені академіка. І. М. Ліфшиця

Протокол від “ 2 ” липня 2016 року протокол № 7

Завідувач кафедри теоретичної фізики академіка. І. М. Ліфшиця

(підпис) \_\_\_\_\_ ( Рашба Г.І. )  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією

фізичного факультету  
назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “ 29 ” серпня 2016 року № 6

Голова методичної комісії \_\_\_\_\_

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

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “теорія низьковимірних систем” складена відповідно до освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки другого рівню вищої освіти – магістр

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

спеціалізації – «фізика»

### 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.

#### 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.

<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
84 год.
Індивідуальні завдання
Не передбачені навчальним планом

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

**володіти** понятійним апаратом теорії низьковимірних систем

**знати** принципи і підходи до опису низьковимірних систем.

**вміти** використовувати симетрійні і топологічні принципи в аналізі фізичних явищ в низьковимірних системах

## 2. Опис навчальної дисципліни

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної і індивідуальної роботи становить  
для денної форми навчання –50%:

## 3. Виклад змісту 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 1. 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 2. 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 1. Симетрія гамільтоніану електронів на решітці відносно обернення часу*

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

*Тема 2. 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 3.  $Z_2$  топологічний інваріант*

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

*Тема 4. Тривимірні топологічні ізолятори*

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

### Розділ 4. Перетворення Березинського-Костерліца-Таулеса.

*Тема 1. Особливості фазових перетворень в двовимірних системах*

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

*Тема 2. 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 3. 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.

#### 4. 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
<b>Розділ 1. Двовимірний електронний газ в магнітному полі.</b>						
Тема 1. Двовимірний електронний газ. Квантовий ефект Холла.	11	2	2			7
Тема 2. Фаза Беррі	13	2	4			7
Тема 3. Топологічні інваріанти в теорії квантового ефекту Холла	9	2				7
Разом за розділом 1	33	6	6			21
<b>Розділ 2. Електронні властивості графену.</b>						
Тема 4. Електронний спектр графену в моделі сильного зв'язку.	11	2		2		7
Тема 5. Теорія лінійного відгуку графену на зовнішні поля.	9	2				7
Разом за розділом 2	20	4	2			14
<b>Розділ 3. Основи теорії топологічних ізоляторів.</b>						
Тема 6. Симетрія гамільтоніану електронів на решітці відносно обернення часу	9	2				7
Тема 7. Моделі двовимірних топологічних ізоляторів	13	2	4			7
Тема 8. $Z_2$ топологічний інваріант	9	2				7
Тема 9. Тривимірні топологічні ізолятори	9	2				7
Разом за розділом 3	40	8	4			28
<b>Розділ 4. Перетворення Березинського-Костерліца-Таулеса.</b>						
Тема 10. Особливості фазових перетворень в двовимірних системах.	9	2				7
Тема 11. Вихорі в надплинних системах. Взаємодія вихорів.	9	2				7
Тема 12. Надплинна щільність і перехід Березинського-Костерліца-Таулеса.	9	2				7
Разом за розділом 4	27	6				21
<b>Усього годин</b>	<b>120</b>	<b>24</b>	<b>12</b>			<b>84</b>

### 5. Теми практичних занять (семінарів).

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Крайові стани в системах з квантовим ефектом Холла	2
2	Ефект Ааронова-Бома і фаза Беррі	2
3	Штучні калібрувальні поля і фаза Беррі	2
4	Тунелювання Клейна в графені	2
5	Балістичний транспорт в одновимірних каналах.	2
6	Гетероструктура HgTe-CdTe як двовимірний топологічний ізолятор: модельний опис.	2
	<b>Усього годин</b>	<b>12</b>

### 5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Двовимірний електронний газ. Квантовий ефект Холла.	7
2	Фаза Беррі	7
3	Топологічні інваріанти в теорії квантового ефекту Холла	7
4	Електронний спектр графену в моделі сильного зв'язку.	7
5	Теорія лінійного відгуку графену на зовнішні поля.	7
6	Симетрія гамільтоніану електронів на решітці відносно обернення часу	7
7	Моделі двовимірних топологічних ізоляторів	7
8	$Z_2$ топологічний інваріант	7
9	Тривимірні топологічні ізолятори	7
10	Особливості фазових перетворень в двовимірних системах.	7
11	Вихорі в надплинних системах. Взаємодія вихорів.	7
12	Надплинна щільність і перехід Березінського-Костерліца-Таулеса.	7
	<b>Усього годин</b>	<b>84</b>

### 6. Індивідуальні завдання

Не передбачено навчальним планом.

### 7. Методи контролю

Підготовка письмової доповіді для виступу на семінарі, виступ на семінарі, екзамен.

### 8. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання		Екзамен	Сума
Розділи 1-4 (Т1-Т12)	Разом		
Письмова доповідь	Виступ на семінарі		
40	20	60	40
			100

### Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	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. 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.

### 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).

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

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

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