

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з наукової
роботи УжНУ

/Студеняк І.П./

28 вересня 2020 року

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
СИМЕТРИЙНІ ТА ТОПОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНОЇ ФІЗИКИ**

Рівень вищої освіти	третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10- Природничі науки
Спеціальність	104 Фізика та астрономія
Освітньо програма статус дисципліни	Фізика та астрономія обов'язкова
Мова навчання	українська

Ужгород 2020

Робоча програма навчальної дисципліни «**Симетрійні та топологічні аспекти сучасної фізики**» для здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії галузі знань **10 Природничі науки спеціальності 104 Фізика та астрономія** освітньої програми **Фізика та астрономія**.

Розробники: Хархаліс Л.Ю., доктор-фізико математичних наук, професор, старший науковий співробітник

Робочу програму розглянуто та затверджено на засіданні кафедри **фізики напівпровідників**

протокол № 1 від « 23 » вересня 2020 р.

Завідувач кафедри  Височанський Ю.М.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

протокол № 1 від « 23 » вересня 2020 р.

Голова науково-методичної комісії  Карбованець М. І.

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Найменування показників	Розподіл годин за навчальним планом	
	Денна форма навчання	Заочна форма навчання
Кількість кредитів ЄКТС –4	Рік підготовки:	
Загальна кількість годин – 120	1	1
Кількість модулів –2	Семестр:	
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних –5 самостійної роботи студента – 8	1	1
	Лекції:	
	28	10
	Практичні (семінарські):	
	20	4
Вид підсумкового контролю: залік	Лабораторні:	
Форма підсумкового контролю: усна	Самостійна робота:	
	72	106

2. МЕТА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Метою вивчення навчальної дисципліни «Симетрійні та топологічні аспекти сучасної фізики» є ознайомлення здобувачів третього рівня вищої освіти з основними поняттями, принципіально новими концепціями та тенденціями сучасних досліджень, які базуються на симетрії і топології, в області фізики і астрономії; формування у них широкого наукового кругозору та цілісної системи знань і навиків в оволодінні методами аналізу явищ, пов'язаних з існуванням топологічних станів.

Місце дисципліни в структурі освітньо-наукової програми: спецкурс відноситься до дисциплін нормативної частини циклу професійної підготовки, за результатами яких здобувачі здають залік та виконують навчальний процес по спеціальності 104 " фізика і астрономія".

Відповідно до освітньої програми, вивчення дисципліни сприяє формуванню у здобувачів третього рівня вищої освіти таких компетентностей:

Інтегральна: здатність розв'язувати комплексні задачі та проблеми в галузі фізики та астрономії, здійснювати у цій галузі професійну та дослідницько-інноваційну діяльність, що передбачає глибоке переосмислення наявних і створення нових цілісних знань та професійної практики.

Загальні компетентності: здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу (ЗК-1); навички використання новітніх інформаційних і комунікаційних технологій (ЗК-2); здатність проведення самостійних досліджень на сучасному рівні (ЗК-3); здатність до пошуку, обробки на аналізі інформації з різних джерел (ЗК-4); -здатність генерувати нові ідеї (креативність) (ЗК-5); здатність працювати в міжнародному науковому просторі (ЗК-6); здатність комунікації на фахову тематику з нефаківцями ЗК-10.

Фахові компетентності: здатність застосовувати фізичні знання для систематизації різноманітних пов'язаних фактів і явищ, які базуються на симетрії і топології, у різних галузях сучасної теоретичної і експериментальної фізики та астрономії (ФК-1); здатність визначати завдання і проблематику фізичного дослідження в галузях сучасної фізики або астрономії (ФК-2); здатність вирізняти із накопичених спостережень відтворювані експериментальні факти (ФК-3); здатність створювати та порівнювати між собою фізичні та математичні моделі фізичних об'єктів, процесів та явищ (ФК-4) ; здатність оцінювати моделі з точки зору їх відповідності фізичним об'єктам, процесам та явищам, для пояснення яких застосовуються дані моделі(ФК-5); оволодіння інформаційними технологіями та електронними засобами проведення, обробки та аналізу результатів дослідження (ФК-8); володіння теоретичними методами, зокрема, симетрійними і топологічними, які застосовуються для вивчення фізичних або астрономічних об'єктів, явищ і процесів в різних галузях сучасної фізики (ФК-10).

3. ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Передумовами вивчення навчальної дисципліни «Симетрійні та топологічні аспекти сучасної фізики» є необхідним знання розділів загальної фізики, теоретичної фізики, квантової механіки, фізики конденсованого стану, фізики низьковимірних систем. У програмі використовуються результати новітніх досліджень з найактуальніших досягнень в області топологічних фазових переходів і топологічних фаз та їх практичного застосування.

4. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

Відповідно до освітньої програми «Фізика та астрономія», вивчення навчальної дисципліни повинно забезпечити досягнення здобувачами вищої освіти таких програмних результатів навчання (ПРН):

Програмні результати навчання	Шифр ПРН
Сучасні передові концептуальні та методологічні знання в галузі фізики і астрономії та суміжних галузей знань.	ПРН 1.1
Фундаментальні праці провідних зарубіжних вчених та наукових шкіл у галузі дослідження	ПРН 1.2.
Формулювати мету власного наукового дослідження в контексті світового наукового процесу, усвідомлювати його актуальність і значення для розвитку інших галузей науки, суспільно-політичного, економічного життя.	ПРН 2.1
Формулювати загальну методологічну базу власного наукового дослідження	ПРН 2.2.
Проводити комплексні дослідження в галузі науково-дослідницької та інноваційної діяльності, які приводять до отримання нових знань.	ПРН 2.3.
Формулювати наукову проблему з огляду на стан її наукової розробки та сучасні наукові тенденції.	ПРН 2.5.
Формулювати робочі гіпотези та моделі досліджуваної проблеми.	ПРН 2.6.
Аналізувати наукові праці в галузі сучасної фізики, виявляючи дискусійні та мало досліджені питання	ПРН 2.7
Здійснювати моніторинг наукових джерел інформації відносно досліджуваної проблеми	ПРН 2.8.
Визначати інформаційну цінність джерел шляхом порівняльного аналізу з іншими джерелами	ПРН 2.9.
Вести спілкування в діалоговому режимі з широкою науковою спільнотою та громадськістю в галузі фізики та астрономії	ПРН 3.1.
Уміти використовувати сучасні інформаційні та комунікативні технології при спілкуванні, обміні інформацією, зборі, аналізі, обробці, інтерпретації джерел.	ПРН 3.5.
Ініціювати наукові та інноваційні комплексні проекти в галузі фізики та астрономії, лідерство та автономність під час їх реалізації.	ПРН 4.1
Самовдосконалюватися, нести відповідальність за новизну наукових досліджень та прийняття експертних рішень	ПРН 4.3

Очікувані результати навчання, які повинні бути досягнуті здобувачами освіти після опанування навчальної дисципліни «Симетрійні та топологічні аспекти сучасної фізики»:

Очікувані результати навчання з дисципліни	Шифр ПРН
Узагальнення і систематизація знань та основних концепцій, теоретичних і практичних проблем в галузі сучасної фізики, зокрема, аспектів симетрії і топології	ПРН 1.1
Знати фундаментальні поняття теорії симетрії і топології (топологічний інваріант, геометричні фази Беррі, симетрія до інверсії в часі), які	ПРН 1.2

базуються на фундаментальних працях провідних зарубіжних вчених та наукових шкіл у галузі дослідження;	
Знати основи зонної теорії, в тому числі з врахуванням спін-орбітальної взаємодії	ПРН1.2
Знати топологію ізоенергетичних поверхонь та особливі явища у фізиці (квантові магнітні осциляції, зонні електрони в електричному полі та блохівські осциляції). інтерференційні ефекти (ефект Ааронова-Бома, явище слабої локалізації);	ПРН 1.2
Знати класифікацію топологічних матеріалів; природу поверхневих станів та явища, які зумовлені топологічними дефектами	ПРН 1.2
Розуміти цілочисельний квантовий ефект Холла у термінах так званих топологічних інваріантів, або чисел Черна.	ПРН 1.2
Вміти застосовувати теоретико-групові підходи до аналізу симетрії і топології енергетичних станів валентної зони кристалів;	ПРН 2.3
Вміти пояснити причини утворення графеноподібної зонної структури. Механізм розщеплення діраківського конуса;	ПРН 2.6
Аналізувати існуючі експериментальні підходи у вивченні топологічних ізоляторів і явищ, які базуються на симетрії і геометричній топології	ПРН 2.7
Вміти орієнтуватись в науковій і науково-популярній літературі та мати представлення про основні тенденції розвитку концепції симетрії та концепції топології в сучасній фізиці,	ПРН 2.7
Вміти використовувати базові теоретичні знання для розв'язку професійних задач, усвідомлювати їх актуальність і значення для розвитку інших галузей науки	ПРН 2.1
Набути навичок підготовки презентацій та виступів на семінарських заняттях	ПРН 3.3
Ініціювати наукові дослідження галузі фізики та астрономії	ПРН 4.1.

4. ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Засоби оцінювання та методи демонстрування результатів навчання

Засобами оцінювання та методами демонстрування результатів навчання з навчальної дисципліни є: заліки, реферати, виступи на практичних (семінарських) заняттях, домашні завдання, підготовка презентації по вибраній темі.

Контрольні заходи включають такі **форми контролю та критерії оцінювання результатів навчання**: поточний, модульний та підсумковий контроль.

Поточний контроль – оцінювання рівня знань, умінь і навичок здобувачів, що здійснюється в ході навчального процесу проведенням усного опитування, контрольної роботи, тестування, домашнього завдання тощо.

Результатом *модульного контролю* є модульна бальна оцінка, за якою підбивається підсумок роботи аспірантів впродовж модуля у відповідності до кредитно-модульної системи оцінювання знань (КМСОЗ).

Підсумковий семестровий контроль проводиться у формі заліку з конкретної навчальної дисципліни в обсязі навчального матеріалу, що визначений навчальною програмою, та в терміни, встановлені графіком навчального процесу. При семестровому контролі отримані здобувачем згідно КМСОЗ переводяться в оцінки за національною шкалою та за шкалою ЄКТС.

Комплексний показник успішності здобувача третього рівня вищої освіти, його обізнаності в предметі, що вивчається, характеризує якість його знань, систематичність,

творчість, активність та самостійність. Максимальна сума балів за всі види робіт (контрольні, самостійне вивчення, практичні (семінарські) заняття) з даного курсу становить 100 балів

За роботу на протязі семестру в залежності від форми контролю виставляється така максимальна кількість балів:

- Поточний контроль за змістовним модулем та самостійна робота 1-30 балів
- Написання реферату та презентація 1-10 балів
- Контрольна робота за змістовним модулем 1 -60 балів

• **Форми контролю та критерії оцінювання результатів навчання**

- Форми поточного контролю: самостійна робота, опитування.
- Форма модульного контролю: контрольна робота.
- Форма підсумкового семестрового контролю: залік.

Підсумковий семестровий контроль з дисципліни «Симетрійні та топологічні аспекти сучасної фізики» здійснюється у формі заліку.

Залік проводиться в усній формі шляхом співбесіди. Результати заліку оцінюються за двобальною шкалою: „зараховано, „незараховано”.

Підсумкова оцінка " зараховано"/"не зараховано" визначається наступними критеріями:

- " зараховано" - якщо аспірант достатньо чітко і грамотно відповідає на питання в межах матеріалу викладеного у рамках лекційних занять, може показати та обґрунтувати взаємозв'язок різних частин матеріалу, пройденого у межах матеріалу навчальної дисципліни; демонструє здатність до мислення, при відповіді на питання розмірковує, спираючись на отримані у рамках курсу знання, не допускає істотних неточностей у відповіді, правильно вибудовує логіку вирішення типових завдань;

- "незараховано" - якщо аспірант викладає основні питання недостатньо чітко або допускає істотні помилки при їх викладі, не може пояснити зав'язків у рамках викладеного матеріалу, аспірант не знає значної частини програмного матеріалу, не може дати точних визначень понять, пройдених у рамках курсу, дає розпливчаті формулювання і не володіє в належній мірі термінологією, плутається при відповіді на додаткові питання, не володіє прийомами вирішення типових завдань.

За бажанням аспіранта результуюча підсумкова оцінка може бути визначена як інтегрована оцінка засвоєння всіх тем дисципліни і кількісно дорівнює середньому арифметичному балів, отриманих за кожний модуль.

Переведення результатів, отриманих за 100-бальною шкалою оцінювання в національну 4-х бальну та шкалу за системою ECTS здійснюється за наступною схемою:

Шкала оцінювання згідно КМСОЗ: ЄКТС та національна

Сума балів	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою
		іспит (залік)
90 – 100	A	відмінно (зараховано)
82 – 89	B	добре (зараховано)
75 – 81	C	
64 – 74	D	задовільно (зараховано)

60 – 63	E	
35 – 59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання (не зараховано)
0 – 34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни (не зараховано)

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти (модуль 1)

Поточне оцінювання та самостійна робота									Модульна контрольна робота	Сума
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	60	100
3	3	4	4	6	8	12				

T1, T2 ... – теми

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти (модуль 2)

Поточне оцінювання та самостійна робота									Модульна контрольна робота	Сума
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	60	100
6	6	8	6	6	4	4				

T1, T2 ... – теми

Оцінювання окремих видів навчальної роботи з дисципліни

Вид діяльності здобувача вищої освіти	Модуль 1		Модуль 2	
	Кількіс ть	Максималь на кількість балів (сумарна)	Кількіс ть	Максималь на кількість балів (сумарна)
Практичні (семінарські) заняття	5	30	5	30
Лабораторні заняття (допуск, виконання та захист)				
Комп'ютерне тестування при тематичному оцінюванні				

Письмове тестування при тематичному оцінюванні				
...				
Презентація	1	5	1	5
Реферат	1	5	1	5
Есе				
...				
Модульна контрольна робота	1	60	1	60
Разом	8	100	8	100

6. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

6.1. Зміст навчальної дисципліни

Модуль 1

Розділ 1. Симетрія в квантовій механіці

Тема 1. Групи та їх властивості. Поняття групи. Зображення і власні функції. Класифікація станів. Проекційні оператори для базисних функцій і базисних матриць. Група поворотів. Хіральної симетрії та її наслідки для власних значень енергії.

Тема 2. Функції, залежні від спіну. Перетворення спінових функцій при власних і невластивих поворотах. Незвідні зображення подвійних груп. Розклад станів простої групи на стани подвійної групи.

Тема 3. Інверсія часу. Теорема Крамерса. Побудова гамільтоніану без врахування спіну. Оператор повороту часу. Вплив інверсії часу на базисні матриці. Виродження, пов'язане з симетрією відносно інверсії в часі. Побудова гамільтоніану з врахуванням спіну електрона.

Розділ 2. Елементи традиційної зонної теорії та фізичні явища, зумовлені топологією ізоенергетичних поверхонь

Тема 4. Від багаточастинкової до одночастинкової проблеми. Рівняння Шредінгера для кристала та основні наближення в зонній теорії. Адіабатичне й одноелектронне наближення. Наближення сильно зв'язаних електронів. Одноелектронна модель кристалу. Кристалічний потенціал і теорема Блоха. Обернений простір, блохівські стани і зонна структура кристалу.

Тема 5. Основні поняття зонної теорії твердого тіла. Закон дисперсії. Ефективна маса як характеристика закону дисперсії. Ізоенергетичні поверхні. Різні типи електронних траєкторій: відкриті і замкнуті. Густина станів та топологічні інваріанти ізоенергетичних поверхонь. Кореляція між особливостями густини станів і топологічними інваріантами ізоенергетичних поверхонь. Характеристика Ейлера-Пуанкаре для кристалів з різними законами дисперсії, у тому числі з наявними \vec{k} -лінійними членами.

Тема 6. Узагальнений підхід в дослідженні симетрії і топології енергетичної структури складних кристалів методами теорії груп. Концепція мінімальних комплексів зон. Поняття про позиції Викоффа. Основні фундаментальні висновки концепції мінімальних комплексів зон та її застосування для кристалів з різною симетрією.

Тема 7. Топологія і фізичні явища. Геометрія і топологія поверхонь Фермі електронного газу в металах. Динаміка електронів провідності і поверхня Фермі. Геометрія поверхні Фермі в кристалі. Квантові магнітні осциляції і форма поверхні Фермі. Магнітний пробій. Зонні електрони в електричному полі і блохівські осциляції. Топологія поверхні Фермі і

низькотемпературний магнітоопір. Топологія характеристичних поверхонь в динаміці і термодинаміці квазічастинок в кристалах. Геометрія ізоенергетичних (ізочастотних) поверхонь і асимптотики розсіяних хвиль. Густина коливних станів в кристалі і сингулярності ван Хофа. Електронний фазовий перехід $2\frac{1}{2}$ роду.

Модуль 2

Розділ 1. Топологічні інваріанти та елементи нетрадиційної зонної теорії.

Тема 1. Геометричні фази в зонній теорії та топологічні інваріанти.

Фази Беррі. Кривизна Беррі і теорема Стокса в параметричному просторі. Топологічний інваріант Черна Z_2 (0.1). Фізичний зміст топологічного інваріанту. Періодична таблиця топологічних ізоляторів. Поляризація як Z_2 топологічний інваріант. Геометричні фази і паралельний транспорт. Базовані на симетрії індикатори зонної топології в 230 просторових групах.

Тема 2. Топологія зон в твердих тілах: від діелектрика до діраковської речовини. Топологічні властивості валентної зони в ізоляторі. *kp*-модель, гамільтоніан Кейна. Вивід ефективного гамільтоніану Властивості і симетрії гамільтоніану. Електронні стани з нетривіальною топологією в діраковських матеріалах Хіральною симетрією у графені. . Об'ємна топологія і крайові стани. Z_2 топологічний інваріант для графену

Розділ 2. Топологічні ізолятори: основи і перспективи

Тема 3. Класифікація ізоляторів. Типи ізоляторів: зонні, андерсонівські, корельовані (молітвські, CDW, перехід Пайєрлса в 1 D системах.), топологічні. Що таке топологічний ізолятор (ТІ). Передісторія розвитку топологічних ізоляторів. Відомі кандидати на роль ТІ. 3D і 2D топологічні ізолятори. Топологічні ізолятори з симетрією інверсії в часі. Графен і топологічні ізолятори: подібність і відмінність. Топологічні дефекти (дислокації, доменні стінки, магнітні вихри). Фазові переходи в двовимірних і одговимірних магнетиках. Теорія Березинського-Костерліца-Таулеса та теорія Халдана -Нобелівських лауреатів. Всесвіт як топологічний ізолятор.

Тема 4. Зонна теорія опису топологічних станів. Особливості зонної структури відомих тривимірних топологічних ізоляторів (SnTe , Bi_2Se_3 , HgTe , Cd_3As_2). Поверхневі стани. Зонна інженерія топологічних ізоляторів через катіонне заміщення. Приклад – система кристалів $\text{Cu}_2\text{HgPbSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{CdPbSe}_4$, $\text{Ag}_2\text{HgPbSe}_4$ і $\text{Ag}_2\text{CdPbTe}_4$). Індуковані тиском топологічні стани. Приклади: $\beta\text{-InSe}$, In_4Se_3 , SnSe , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Тема 5 . Топологічна природа квантового ефекту Холла. Квантовий ефект Холла. Від цілочисельного квантового ефекту Холла до спінового ефекту Холла. Топологічні аспекти рівня Ландау в графені. Зв'язок холлівської провідності з кривизною Беррі. Числа Черна для блохівських електронів. Топологічні ізолятори як узагальнення квантового спінового ефекту Холла. Топологічний фазовий перехід в квантових ямах CdTe/HgTe .

Тема 6. Властивості топологічних ізоляторів. Спіновий транспорт без дисипації. Магнітоелектричний ефект. Магнітооптичний ефект. Симетрія і топологія надпровідників. Майоранівські стани.

Тема 7. Симетрія і топологія в антиферромагнітній спінтроніці. Магнітна симетрія і спінтронні ефекти. Топологічні антиферромагнітні фази. Топологічний ефект Холла і антиферромагнітні скірміони.

6.2. Структура навчальної дисципліни

Денна форма

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Форма навчання:					
	Усього	у тому числі				
лекції		практичні (семінарські)	лабораторні	індивідуальна робота	самостійна робота	
1-й семестр						
Модуль 1						
Розділ 1. Симетрія в квантовій механіці	12	4				8
Тема 1. Групи та їх властивості.	6	2				4
Тема 2-3. Функції, залежні від спіну. Інверсія часу. Теорема Крамерса	6	2				4
Розділ 2. Елементи традиційної зонної теорії та фізичні явища, зумовлені топологією ізоенергетичних поверхонь	44	10	8			26
Тема 4 Від багаточастинкової до одночастинкової проблеми. Рівняння Шредінгера для кристала та основні наближення в зонній теорії.	2	2				
Тема 5. Основні поняття теорії зонної теорії твердого тіла.	14	4	4			6
Тема 6 Узагальнений підхід в дослідженні симетрії і топології енергетичної структури складних кристалів методами теорії груп.	14	2	4			8
Тема 7 Топологія і фізика твердого тіла.	14	2				12
Модульна контрольна робота	2		2			
Разом за модуль	58	14	10			34
Модуль 2						
Розділ 1 Топологічні інваріанти та елементи нетрадиційної зонної теорії.	20	4	4			12
Тема 1. Геометричні фази в зонній теорії та топологічні інваріанти.		2	2			4
Тема 2. Топологія зон в твердих тілах: від діелектрика до діраковської речовини.		2	2			8
Розділ 2. Топологічні ізолятори:основи і перспективи	40	10	4			26
Тема3. Класифікація ізоляторів. . Передісторія розвитку топологічних ізоляторів.	4	2				2
Тема 4. Зонна теорія опису топологічних станів.	14	2	2			10
Тема 5. Топологічна природа квантового ефекту Холла.	8	2	2			4
Тема 6. Властивості топологічних ізоляторів. Симетрія і топологія надпровідників.	6	2				4

Тема 7. Симетрія і топологія в антиферромагнітній спінтроніці	8	2				6
Модульна контрольна робота	2		2			
Разом за модуль	62	14	10			38
Разом за семестр	120	28	20			72

Заочна форма навчання

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Форма навчання:					
	Усього	у тому числі				
лекції		практичні (семінарські)	лабораторні	індивідуальна робота	самостійна робота	
1-й семестр						
Модуль 1						
Розділ 1. Симетрія в квантовій механіці	12					8
Тема 1. Групи та їх властивості.	6					4
Тема 2-3. Функції, залежні від спіну. Інверсія часу. Теорема Крамерса	6					4
Розділ 2. Елементи традиційної зонної теорії та фізичні явища, зумовлені топологією ізоенергетичних поверхонь	46	4	2			40
Тема 4 Від багаточастинкової до одночастинкової проблеми. Рівняння Шредінгера для кристала та основні наближення в зонній теорії.	4					4
Тема 5. Основні поняття теорії зонної теорії твердого тіла.	16	2	2			12
Тема 6 Узагальнений підхід в дослідженні симетрії і топології енергетичної структури складних кристалів методами теорії груп.	12					12
Тема 7 Топологія і фізика твердого тіла.	14	2				12
Модульна контрольна робота	2					
Разом за модуль	58	4	2			48
Модуль 2						
Розділ 1 Топологічні інваріанти та елементи нетрадиційної зонної теорії.	16	2				14
Тема 1. Геометричні фази в зонній теорії та топологічні інваріанти.	4					4
Тема 2. Топологія зон в твердих тілах: від діелектрика до діраковської речовини.	12	2				10
Розділ 2. Топологічні ізолятори: основи і перспективи	50	4	2			44
Тема 3. Класифікація ізоляторів. . Передісторія розвитку топологічних ізоляторів.	10	2				8

Тема 4. Зонна теорія опису топологічних станів.	14	2	2			10
Тема 5. Топологічна природа квантового ефекту Холла.	8	2				10
Тема 6. Властивості топологічних ізоляторів. Симетрія і топологія надпровідників.	6					8
Тема 7. Симетрія і топологія в антиферромагнітній спінтроніці	8					8
Модульна контрольна робота	2					
Разом за модуль	62	6				58
Разом за семестр	120	10	4			106

6.3. Теми практичних (семінарських, лабораторних) занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна	заочна
1	Теоретико -групові методи опису симетрії і топології енергетичних станів у кристалах різної симетрії в рамках концепції мінімальних комплексів зон та методу індукування	4	
2	Закони дисперсії, густина станів, топологія ізоенергетичних поверхонь та їх наслідки для фізичних явищ	2	
3	Кореляція між особливостями густини станів і топологічними інваріантами ізоенергетичних поверхонь. Характеристика Ейлера-Пуанкаре для кристалів з різними законами дисперсії, у тому числі з наявними \vec{k} -лінійними членами.	2	
4	Фази Беррі. Кривизна Беррі і теорема Стокса в параметричному просторі. Топологічний інваріант Черна Z_2 (0.1). Фізичний зміст топологічного інваріанту. Розрахунок Z_2 інваріанту. Приклади. Симетрійна класифікація топологічних ізоляторів	4	2
5	Графен. Електронні стани з нетривіальною топологією в діраковських матеріалах . Об'ємна топологія і крайові стани. Z_2 топологічний інваріант для графену.	2	
6	Особливості зонної структури відомих тривимірних топологічних ізоляторів (SnTe, Bi ₂ Se ₃ , HgTe, Cd ₃ As ₂). Поверхневі стани. Зонна інженерія топологічних ізоляторів.	2	
7	Топологічна природа квантового ефекту Холла.. Зв'язок холлівської провідності з кривизною Беррі. Числа Черна для блохівських електронів	4	2
9			
Разом		20	4

6.4. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна	заочна

1	Оволодіння основними поняттями теорії груп (елементи симетрії, точкова, просторова групи, група поворотів, подвійні групи, операція інверсії часу, теорема Крамерса, побудова незвідних зображень і власних функцій, класифікація станів)	8	20
2	Наближення порожньої гратки як простий метод експресного передбачення структури валентної зони. Основні фундаментальні висновки концепції мінімальних комплексів зон та її застосування для кристалів з різною симетрією.	8	12
3	Аналіз законів дисперсії та ізоенергетичних поверхонь для деяких напівпровідників (германій, кремній, In ₄ Se ₃ , телур).	6	12
4	Топологічна теорія міжатомних взаємодій, Атомні заряди по Маллікену.	4	8
5	Особливості розподілу квантових станів у 3D, 2D та 1D структурах	4	10
6	Дослідження густини коливних станів в кристалі з різною структурною топологією і сингулярності ван Хофа. Закон дисперсії фононів для сильно анізотропних кристалів у моделі Ліфшиця.	4	8
7	Геометричні фази і паралельний транспорт. Ефект Ааронова-Бома. Фаза Беррі і топологія траєкторій в магнітному полі.	4	4
8	<i>kp</i> - гамільтоніан для хвиль зарядової густини (CDW) стану. Аспекти симетрії і топології для фази хвиль зарядової густини (Приклад 1T-TiSe ₂).	4	6
	Класифікація Майорана-Вейля-Дірака для ферміонів.	4	2
9	Першопринципні розрахунки зонної структури топологічних ізоляторів.	6	8
10	Топологічні фонони і їх прояв в транспортних властивостях.	4	4
	Нові фази квантової матерії і топологія Нобелівська премія 2016.	4	4
	Топологічні надпровідники і майоранівські ферміони	4	
	Магнітна симетрія і спітронні ефекти.	6	6
	Всесвіт як топологічний ізолятор.	2	2
	Підготовка до модульних контрольних і заліку		
	Разом	72	106

6.5. Індивідуальні завдання

Теми рефератів

1. Симетрія в квантовій механіці.
2. Топологія: кристалічна структура і зони.
3. Аналіз новітніх досягнень в області топологічних матеріалів.
4. Всесвіт як топологічний ізолятор/
5. Динаміка діраковських ферміонів у топологічних ізоляторах.
6. Квантовий ефект Холла.
7. Періодичність Ботта.
8. Нетардиційна надпровідність на поверхневих станах

7. ІНСТРУМЕНТИ, ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ВИКОРИСТАННЯ ЯКИХ ПЕРЕДБАЧАЄ НАВЧАЛЬНА ДИСЦИПЛІНА

Лекційний курс передбачає використання технічних засобів навчання, комп'ютерних проєкторів.

8. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Основна література

1. А.И.Ансельм. Введение в теорию полупроводников.- М.:Наука,1978.-615 с.
2. Ф.Бассани, Дж.Пастори Парравичини. Электронные состояния и оптические переходы в твердых телах.-Москва.:Наука, 1982.-388 с.
3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. Нерелятивистская теория.- 3-е изд., М.: Наука, 1974.
4. Ковалев О.В. Неприводимые и индуцированные представления и копредставления федоровских групп. – М.:Наука, 1986.– 368 с.
5. J.K.Asboth, L.Oroszlany, A.Palyi. A short course on topological isolators. Band structures and edge states in one and two dimensions .- Springer International Publishing, 2016.- 166 p.
6. C.L. Kane. Topological Band Theory and the Z_2 Invariant <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63314-9.00001-9>
7. В.Ф.Гантмахер. Электроны в неупорядоченных средах.-Москва, Физматлит. 2013.
8. L.Fu and C. L. Kane. Topological insulators with inversion symmetry.- Phys.Rev.B.-2007.- 76, P.045302 <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.045302>
9. M. Z. Hasan and C. L. Kane. *Colloquium*: Topological insulators. Rev. Mod. Phys.-2010.- 82, 3045 – <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3045>
10. O.L.Smejkal, T.Jungwirth. Symmetry and topology in antiferromagnetic spintronics n book: Topology in Magnetism DOI: [10.1007/978-3-319-97334-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97334-0_9)
11. А.Я.Шик, Л.Г.Бакуева, С.Ф.Мусихин, С.А. Рыков. Физика низкоразмерных систем. Санкт-Петербург: Наука, 2001.- 155 с.
12. Д.М.Заячук. Нанотехнології і наноструктури. Навч.посібник.- Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. – 580 с.
13. И.С.Бурмистров. Введение в теорию целочисленного квантового эффекта Холла.- Москва 2015.- 96 с.

Допоміжна література

1. Zak J. Continuity chords of bands in solids: The diamond structure/ J. Zak // Phys. Rev. B. – 1982. – Vol. 25, №2. – P. 1344–1357.
2. Universality of the empty-lattice approximation to predict the topology of energy spectra of high-symmetry crystals and superlattices based upon them/ M. Sznajder, D.M. Bercha, K.E. Glukhov [et al.] // Acta Physica Polonica A. - 2006. - Vol. 110, No.3. - P. 369-378.
3. В.А.Кашурников, А.В.Красавин, А.И.Маймистов, П.Ф.Карцев. Сверхтекучесть и бозе-конденсация.- Учебное пособие,- Москва,2008.- 167 с.

Інформаційні ресурси в мережі Інтернет

1. A. A. Soluyanov... Topological aspects of band theory
<https://pdfs.semanticscholar.org/00ad/760604b09136ad3bea15c9f6cdb7da6c2e66.pdf>
2. D. Carpentier Topology of Bands in Solids : From Insulators to Dirac Matter
<https://hal-ens-lyon.archives-ouvertes.fr/ensl-01053735/document>
3. L/ Z/ Braun. Electron and Phonon Dynamics in Topological Insulators at THz Frequencies. - September 2016.
<https://pdfs.semanticscholar.org/5f68/7056a72edab1c9501ee073e632038dc165d7.pdf>
4. X.Chen. Symmetry protected topological phases.
https://www.its.caltech.edu/~xcchen/img/Summer_School/lecture-CalSWARM.pdf