

ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ім. Б.І. ВЕРКІНА  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України



М.І. Глушук  
« 16 » 09 2020 р.

**ПРОГРАМА**

навчальної дисципліни

**Сучасні проблеми теоретичної фізики конденсованого стану**  
(назва навчальної дисципліни)

з галузі знань «10 Природничі науки»  
за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

<i>Рівень вищої освіти</i>	<u>третій (освітньо-науковий)</u>
<i>Освітня програма</i>	<u>доктор філософії</u>
<i>Форма навчання</i>	<u>денна</u>
<i>Загальний обсяг у кредитах</i>	
<i>Європейської кредитної трансферно-накопичувальної системи:</i>	<u>4 кредити ЄКТС</u>

Харків - 2020

РОЗРОБЛЕНО ТА ВНЕСЕНО:

Фізико–технічним інститутом низьких температур ім. Б. І. Веркіна  
Національної академії наук України  
(повне найменування вищого навчального закладу)

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

**Ковальов Олександр Семенович** - доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу теоретичної фізики Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

**Богдан Михайло Михайлович** - доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу теоретичної фізики Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Програма затверджена Вченою радою Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р., протокол № \_\_\_.

## 1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів – 4	Галузі знань: - «10 Природничі науки»	Обов'язковий
Загальна кількість годин – 120 (36 аудиторних)	Спеціальність: - «104 Фізика та астрономія»	
Тижневих годин для денної форми навчання аудиторних – 2 самостійної роботи здобувача – 8	Освітньо-науковий рівень: доктор філософії	<i>Лекції, годин</i>
		30
		<i>Семінари, годин</i>
		6
		<i>Самостійна робота, годин</i>
		84
		<i>Вид контролю</i>
		іспит

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

**Метою** вивчення дисципліни “Сучасні проблеми теоретичної фізики конденсованого стану” є формування у майбутнього науковця широкого погляду на сучасні проблеми теоретичної фізики, пов’язані з нелінійними явищами в конденсованих середовищах (в першу чергу – в твердих тілах) і явищами, пов’язаними зі складною структурою цих середовищ. Метою є також ознайомлення аспірантів із стандартними сучасними підходами, моделями та методами теоретичного дослідження таких складних об’єктів. Метою є також довести до аспірантів уявлення про різноманітні прояви нелінійної динаміки, як до єдиного природного явища, яке може бути досліджено загальними стандартними методами сучасної «нелінійної фізики». Освітньою ціллю курсу є формування вміння у аспірантів за допомогою викладених загальних підходів вирішувати конкретні задачі теоретичної і експериментальної фізики, в яких суттєвим чином проявляються нелінійні властивості конкретних фізичних систем конденсованого стану.

### Завдання:

Завдання:

- надати аспірантам інформацію про стандартні сучасні підходи, моделі та методи теоретичного дослідження;
- довести до аспірантів уявлення про різноманітні прояви нелінійної динаміки, як до єдиного природного явища, яке може бути досліджено загальними стандартними методами сучасної «нелінійної фізики»
- дати інформацію про напрями досліджень і розробок в області теоретичної фізики конденсованого стану;
- навчити аспірантів застосовувати базові знання в галузі теоретичної фізики конденсованого стану до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

У результаті вивчення курсу аспірант повинен

**знати:**

- основні відомі прояви нелінійних явищ у природі та експериментах;
  - якісні, наближені і точні методи аналізу нелінійних динамічних систем;
  - методи розв'язання звичайних нелінійних диференціальних рівнянь ;
  - основи теорії еліптичних функцій і інтегралів;
  - характеристики нелінійних коливань;
  - нелінійну динаміку систем з кінцевим числом ступенів вільності;
  - моделі одновимірних дискретних та неперервних динамічних систем;
  - методи виведення типових нелінійних еволюційних рівнянь в різних фізичних явищах;
  - характеристики лінійних і нелінійних хвиль в системах з розподіленими параметрами;
  - фізичну причину просторової локалізації збуджень в нелінійних системах;
  - основні типи солітонних збуджень в нелінійних системах;
  - - квазікласичну трактовку існування солітонних збуджень;
  - основу теорії топологічних станів в нелінійних системах;
  - - солітонну теорію збурень;
  - - основи теорії динамічного хаосу в нелінійних системах;
  - - основні області впровадження теорії нелінійних явищ в фізиці конденсованого стану, зокрема в фізичних експериментах;
  - експериментальні дані в області нелінійної оптики, акустики та спінтроники;
- Та вміти запроваджувати отриману інформацію з теорії нелінійних явищ в конденсованих середовищах в своїх майбутніх теоретичних та експериментальних дослідження в цій області «нелінійної фізики».

Внаслідок вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен бути здатним продемонструвати такі **програмні результати навчання** (згідно з освітньо-науковою програмою «ФІЗИКА»):

**знання:**

- 1) здобуття поглиблених знань і розумінь в фізиці та споріднених областях, включаючи методики проведення експериментів та/або теоретичних наукових досліджень (ПРН-1.1);
- 2) здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації (ПРН-1.2);
- 3) здатність ясно та ефективно описувати результати наукової роботи (ПРН-1.3);
- 4) здатність вести спеціалізовані наукові семінари та публікувати наукові статті в вітчизняних та закордонних наукових журналах (ПРН-1.4);
- 5) здатність робити огляд та пошук інформації в спеціалізованій літературі, використовуючи різноманітні ресурси: журнали, бази даних, он-лайн ресурси (ПРН-1.5);
- 6) здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі індивідуальних досліджень (ПРН-1.6);
- 7) досягнення відповідних знань, розумінь та здатностей використання методів аналізу даних та статистики на найбільш сучасному рівні (ПРН-1.7).

**уміння:**

- 1) здійснювати пошук, аналізувати і критично оцінювати інформацію з різних джерел (ПРН-2.1);
- 2) самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати (ПРН-2.2);
- 3) обирати методи і моделювати явища та процеси різної складності при вирішенні фізичних задач з урахуванням спеціалізації в конкретних галузях фізики конденсованого стану (ПРН-2.3);

- 4) поєднувати теорію і практику, а також приймати рішення та виробляти стратегію діяльності для вирішення завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересів (ПРН-2.4);
- 5) застосовувати знання і розуміння для розв'язування задач синтезу та аналізу елементів та систем, характерних обраній спеціалізації (ПРН-2.5);
- 6) ефективно працювати як індивідуально, так і у складі команди (ПРН-2.6);
- 7) застосовувати системний підхід, інтегруючи знання з інших дисциплін та враховуючи нетехнічні аспекти, підчас розв'язання науково-дослідних завдань з обраною спеціалізацією та проведення досліджень (ПРН-2.7);
- 8) аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення (ПРН-2.8);
- 9) підготувати запит на отримання фінансування, звіту документацію (ПРН-2.9).
- 10) формулювати науково і технічно значиму проблематику, володіти різними формами її публічної презентації (он-лайн презентації, публічні лекції, науково-популярні тексти тощо) (ПРН-2.10).

Здобути комунікативні навички та набути навичок працювати автономно і відповідально:

- 1) ефективно спілкуватись на професійному та соціальному рівнях, включаючи усну та письмову комунікацію іноземною мовою (ПРН-3.1);
- 2) кваліфіковано представляти та обговорювати отримані результати та здійснювати трансфер набутих знань (ПРН-3.2).
- 3) здатність адаптуватись до нових умов та самостійно приймати рішення (ПРН-4.1);
- 4) здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань (ПРН-4.2);
- 5) здатність відповідально ставитись до виконуваної роботи та досягати поставленої мети з дотриманням вимог професійної етики (ПРН-4.3);
- 6) здатність самовдосконалюватися, нести відповідальність за новизну наукових досліджень та прийняття експертних рішень (ПРН-4.4);
- 7) здатність демонструвати розуміння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування (ПРН-4.5).

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток у аспірантів загальних та фахових **компетентностей**:

- ЗК-1 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;
- ЗК-2 Здатність проведення досліджень на відповідному рівні;
- ЗК-5 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації;
- ЗК-8 Здатність бути критичним і самокритичним;
- ЗК-9 Здатність до практичного застосування знань;
- ЗК-10 Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;
- ЗК-11 Здатність генерувати нові ідеї (креативність).
- ЗК-12 Здатність до наукового мислення, зокрема володіння загальнонауковими (філософськими) компетентностями, спрямованими на формування системного наукового світогляду, професійної етики та загального культурного кругозору.
- ЗК-13 Здатність дотримуватись морально-етичних правил поведінки, а також академічної доброчесності, характерних для учасників академічного середовища.
- ФК-1 Концептуальні та методологічні знання щодо історії розвитку та сучасного стану наукових досліджень з основних напрямів фізики.
- ФК-2 Поглибленні спеціалізовані знання з того напрямку сучасної фізики, який був обраний для проведення власного наукового дослідження, та розуміння сучасних фізичних теорій і методів,

спроможність до їхнього аналізу та ефективного застосування в практиці наукової та науково-педагогічної діяльності і проведенні досліджень.

ФК-4 Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у фізиці і дотичних до неї міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з фізики та суміжних галузей.

ФК-6 Здатність самовдосконалюватися, презентувати результати досліджень фахівцям і нефхівцям.

ФК-7 Здатність до формулювання наукових задач та планування стратегій їхнього розв'язання з можливістю інтеграції знань з різних наукових сфер та застосуванням системного підходу в практичній діяльності.

ФК-10 Здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі узагальнення власних експериментальних або теоретичних досліджень з фізики.

ФК-11 Здатність інтегрувати знання з інших дисциплін, застосовувати системний підхід та враховувати комплексні аспекти при розв'язанні проблемних завдань та проведенні наукових досліджень.

ФК-12 Знати та вміти застосовувати фундаментальні знання з фізики конденсованого стану для аналізу явищ та процесів, які відбуваються в твердих тілах і рідинах, знати основні закономірності утворення структури твердих тіл та взаємозв'язок структури з фізичними властивостями твердих тіл, вміти використовувати основні принципи сучасної фізики конденсованого стану до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

ФК-13 Знати основи чисельного моделювання, обчислювальних методів, підходів і систем та вміти їх застосовувати в наукових експериментах, при моделюванні фізичних процесів, розрахунках та обробці даних. Вміти обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи знання з математики і теоретичної фізики, використовувати пакети чисельної обробки експериментальних даних, пакети фізичного та математичного моделювання.

ФК-14 Знати основні поняття теорії електронних і фононних спектрів твердих тіл і експериментальних методів їх дослідження, положення квантової теорії і статистичної фізики кристалічних систем та вміти проводити аналіз різноманітних властивостей твердих тіл на основі електронних та фононних спектрів кристалів.

ФК-15 Знати сучасні підходи, моделі та методи теоретичного дослідження конденсованих середовищ (в першу чергу – в твердих тілах) і явищ, пов'язаних зі складною структурою цих середовищ. Вміти вирішувати конкретні задачі теоретичної і експериментальної фізики з використанням сучасних підходів, моделей та методів теоретичного дослідження.

### **Пререквізити**

Вивчення дисципліни передбачає володіння базовими знаннями та навиками з курсів загальної фізики, теоретичної механіки, теорії поля і квантової механіки, теорії суцільних середовищ і гідродинаміки, знання диференціального числення, отриманих під час здобуття ступеня магістра.

### **Постреквізити**

Основні положення навчальної дисципліни повинні допомогти аспірантам увійти в сучасну галузь теоретичної фізики – фізики нелінійних явищ, і використати отримані знання в самостійній роботі по дослідженню цих явищ в першу чергу в конденсованих середовищах.

### **3. Анотація навчальної дисципліни**

Курс «Сучасні проблеми теоретичної фізики конденсованого стану» є курсом зі спеціалізації, який узагальнює та систематизує знання аспірантів, отримані у інших курсах, а також знайомить з новими ідеями та методами сучасної теоретичної фізики в галузі фізики конденсованого стану, зокрема нелінійних явищ в фізиці кристалічної ґратки, магнітовпорядкованих середовищ та гідродинамічних явищ.

### **4. Структура навчальної дисципліни**

#### **Тема 1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ. ДИНАМІКА СИСТЕМ З КІНЦЕВИМ ЧИСЛОМ СТУПЕНІВ СВОБОДИ.**

Нелінійні збудження в природі (вихорі, цунамі, перекидання хвиль). Основи нелінійної динаміки систем з одним ступенем вільності: ангармонійний осцилятор. Метод фазової площини, асимптотичні методи, теорія еліптичних функцій. Нелінійний зсув частоти. Активно-дисипативні нелінійні системи. Нелінійні системи з двома ступенями вільності. Інтеграли руху. Нерівномірне розподілення енергії між ступенями вільності.

#### **Тема 2. НЕЛІНІЙНІ ДИСКРЕТНІ СИСТЕМИ ТА СИСТЕМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.**

Одновимірні ланцюжки частинок з нелінійним зовнішнім і міжчастинковим параметрами взаємодії. Локалізація енергії в нелінійних ланцюжках. Інтегровні дискретні одновимірні системи. Довгохвильове наближення динаміки нелінійних ланцюжків. Рівняння Буссінеска і модифіковане рівняння Буссінеска.

#### **Тема 3. ОСНОВНІ ТИПИ НЕЛІНІЙНИХ ЕВОЛЮЦІЙНИХ РІВНЯНЬ.**

Слабодиспергуючі середовища. Нелінійні звукові хвилі. Нелінійні гравітаційні хвилі. Виведення рівняння Буссінеска в гідродинаміці. Рівняння Кортевега-де-Фріза. Сильно диспергуючі системи. Нелінійні хвилі на глибокій воді. Нелінійне рівняння Шредінгера. Надплинний гелій і рівняння Гросса-Пітаєвського. Нелінійна динаміка магнетиків і рівняння Ландау-Ліфшиця. Теорія пластичності і сінусоїдальне рівняння Клейна-Гордона.

#### **Тема 4. ЛІНІЙНІ І НЕЛІНІЙНІ ХВИЛІ І ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.**

Характеристики лінійних хвиль: фазова та групова швидкості, закон дисперсії. Нелінійний закон дисперсії. Стійкість нелінійних хвиль різного типу. Еволюція нелінійних хвиль. Асимптотичні методи дослідження нелінійних хвиль.

#### **Тема 5. ДИНАМІЧНІ СОЛІТОНІ І ЇХ ВЛАСТИВОСТІ.**

Однопараметричні динамічні солітони КдФ і рівняння Буссінеска. Двопараметричні солітони нелінійного рівняння Шредінгера. Двопараметричні солітони рівняння Ландау-Ліфшиця. Солітонні інтеграли руху. Квазікласична теорія солітонів. Солітони, як зв'язані стани багатьох елементарних збуджень. Стійкість солітонів. Взаємодія солітонів і багато-солітонні розв'язки.

## **Тема 6. ТОПОЛОГІЯ В ФІЗИЦІ КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ І ТОПОЛОГІЧНІ СОЛІТОНИ.**

Системі з дискретно та неперервно вродженими основними станами. Одновимірні топологічні солітони: доменні границі та дислокації, хвиля зарядової густини і краудіони. Двовимірні топологічні солітони: вихорі в надплинному гелії і магнітні вихорі в легко площинному ферромагнетичу. Вихорі в гідродинаміці. Магнітні скірміони і скірміонні решітки в легковісних магнетиках з взаємодією Дзялошинського. Тривимірні топологічні солітони – скірміони і хопфіони.

## **Тема 7. ДИНАМІЧНИЙ ХАОС.**

Сценарії динамічного хаоса в кінцевовимірних системах. Гомоклінічні структури в явищі нелінійного резонансу. Дивні атрактори в системах з півторами ступенями вільності. Хаос в гамільтонових системах. Хаос в системах з розподіленими параметрами і активно-дисипативних середовищах. Інтегровний хаос.

## **Тема 8. НЕЛІНІЙНА ФІЗИКА В ЕКСПЕРИМЕНТІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИКЛАДЕННЯХ.**

Нелінійна оптика. Рівняння Хасегави и Манакова. Оптичні солітони в волоконній оптиці. Оптичні підсилувачі та лінії затримки. Штучні оптичні кристали і фотоніка. Експерименти з магнітними солітонами-булітами. Магнітні лінії затримки. Магнітна пам'ять на основі магнітних баблів і магнітних дотів. Спінтроніка і солітонна логіка на базі доменних границь, магнітних вихорів і скірміонів

## **Тема 9. ГЕОМЕТРІЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ КРИСТАЛІЧНИХ ГРАТОК.**

Трансляційна симетрія. Прості і складні кристалічні ґратки. Решітки Браве. Класи симетрії. Сингонії. Обернена ґратка. Зони Бріллюена. Дифракція на кристалі. Використання проникаючого випромінювання для визначення структури кристала. Рівняння Лауе. Закон Вульфа-Брегга.

## **Тема 10. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ КЛАСИЧНОЇ ДИНАМІКИ КРИСТАЛІВ.**

Рівняння малих коливань. Закон дисперсії стаціонарних коливань. Спектр значень квазіхвильового вектора. Нормальні координати коливань кристала. Коливання одновимірного кристала. Поверхні постійної частоти. Густина коливань кристала. Особливості ван Хофа. Густина коливань низьковимірних кристалів. Функція Гріна рівняння коливань та її зв'язок з густиною коливань.

## **Тема 11. КЛАСИЧНА ДИНАМІКА ПРОСТИХ І СКЛАДНИХ ГРАТОК.**

Довгохвильове наближення і макроскопічні рівняння для поля зміщень. Малі коливання лінійного ланцюжка. Коливання сильно анізотропного кристала. Оптичні коливання складної решітки. Аналіз законів дисперсії. Оптичні коливання одновимірного двоатомного кристала. Молекулярні кристали. Перетин спектрів. Кросова ситуація. Зняття вродження спектрів.

## **Тема 12. КВАНТОВА МЕХАНІКА КРИСТАЛІВ.**



Квантування малих коливань кристала. Зображення чисел заповнення. Основний стан кристала. Фонони. Квантові кристали. Ангармонізм коливань кристала і взаємодія фононів. Ефективний гамільтоніан взаємодії фононів і процеси розпаду. Квантово-механічне визначення функцій Гріна. Корелятор зміщень і середній квадрат зміщення атома. Непружна дифракція на кристалі і відновлення закону дисперсії коливань.

### **Тема 13. ТЕОРІЯ ДЕФЕКТІВ У КРИСТАЛАХ.**

Моделі точкових дефектів кристалічної решітки. Локалізація коливань поблизу ізольованого ізотоп-дефекту. Функція Гріна для кристала з точковими дефектами. Локальні коливання при наявності двовимірного (плоского) дефекту. Дислокації і дисклінації.

### **Тема 14. НЕЛІНІЙНІ ЗБУДЖЕННЯ У КРИСТАЛІЧНИХ ГРАТКАХ.**

Рівняння Буссінеска і поодинокі ударна хвиля в ангармонічному кристалі. Дискретна модель Френкеля-Конторової для краудіонів. Рівняння синус-Гордон. Солітон як частинка в одновимірному кристалі. Гармонічні коливання в 1D кристалі, що містить краудіон (кінк). Урахування вищої дисперсії. Топологічні солітонні комплекси, їх утворення і розпад.

### **Тема 15. ДИСКРЕТНІ КІНКИ І БРИЗЕРИ У КРИСТАЛАХ.**

Розв'язок континуального рівняння синус-Гордон методом Хіרותи. Двосолітонні розв'язки і бризер рівняння синус-Гордон. Нелінійна решітка і дискретне рівняння Тоди. Солітони деформації у решітці Тоди. Нелінійна решітка Хіרותи і самодуальна лінія передачі. Дискретні солітони і бризери решітки Хіרותи та їх взаємодія. Квазікласичні спектри дискретних бризерів і гамільтонові рівняння для їх динамічних змінних.

## Загальна структура навчальної дисципліни

№	Назва теми	у тому числі			
		Усього	Лекції, годин	Семинар, годин.	Самостійна робота, годин
1.	Методи дослідження нелінійних коливань, динаміка систем з кінцевим числом ступенів свободи.	8	2		6
2.	Нелінійні дискретні системи та системи з розподіленими параметрами.	10	2	2	6
3.	Основні типи нелінійних еволюційних рівнянь.	8	2		6
4.	Лінійні і нелінійні хвилі і їх характеристики.	8	2		6
5.	Динамічні солітони і їх властивості.	8	2		6
6.	Топологія в фізиці конденсованого стану і топологічні солітони.	8	2		6
7.	Динамічний хаос.	8	2		6
8.	Нелінійна фізика в експерименті та технологічних прикладеннях.	10	2	2	6
9.	Геометрія і класифікація кристалічних ґраток.	8	2		6
10.	Основні поняття класичної динаміки кристалів.	8	2		6
11.	Класична динаміка простих і складних ґраток.	8	2		6
12.	Квантова механіка кристалів.	10	2	2	6
13.	Теорія дефектів у кристалах.	8	2		6
14.	Нелінійні збудження у кристалічних ґратках.	5	2		3
15.	Дискретні кінки і бризери в кристалах.	5	2		3
	Усього, годин	<b>120</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>84</b>

### Теми лекційних занять

№	Назва лекції	Кількість годин
1.	Методи дослідження нелінійних коливань, динаміка систем з кінцевим числом ступенів свободи.	2
2.	Нелінійні дискретні системи та системи з розподіленими параметрами	2
3.	Основні типи нелінійних еволюційних рівнянь	2
4.	Лінійні і нелінійні хвилі і їх характеристики.	2

5.	Динамічні солітони і їх властивості	2
6.	Топологія в фізиці конденсованого стану і топологічні солітони	2
7.	Динамічний хаос.	2
8.	Нелінійна фізика в експерименті та технологічних прикладеннях	2
9.	Геометрія і класифікація кристалічних ґраток.	2
10.	Основні поняття класичної динаміки кристалів.	2
11.	Класична динаміка простих і складних ґраток.	2
12.	Квантова механіка кристалів.	2
13.	Теорія дефектів у кристалах.	2
14.	Нелінійні збудження у кристалічних ґратках	2
15.	Дискретні кінки і бризери в кристалах	2
	<b>Разом</b>	<b>30</b>

### Теми семінарських занять

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Наближені, асимптотичні, якісні, точні та чисельні методи в теорії нелінійних явищ	2
2.	Методи Хіроті, Беклунда, «одягання» і оберненої задачі теорії розсіювання для інтегровних нелінійних рівнянь	2
3.	Побудова точних бризерних розв'язків нелінійних континуальних і дискретних рівнянь	2
	<b>Разом</b>	<b>6</b>

### Самостійна робота

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Нелінійні коливання. Нелінійний зсув частоти та субгармоніки. Метод фазової площини. Особливі точки на фазовій площині. Резонансне наближення. Метод Ван-дер Поля. Асимптотичні розкладення. Еліптичні функції Якобі.	6
2.	Системи зв'язаних нелінійних систем. Поверхня потенційної енергії. Зв'язані нелінійні хвильоводи. Зв'язані магнітні моменти. Зв'язані осцилятори Дюфінга. Головні нелінійні моди. Розподіл енергії між ступенями вільності.	6
3.	Динамічні рівняння для поздовжніх, поперечних та згинальних коливань нелінійних пружних ланцюжків. Довгохвильове розглядання. Виведення рівнянь Буссінеска і синусоїдального рівняння Гордону. Закони дисперсії лінійних хвиль.	6
4.	Виведення рівняння КдФ для нелінійних гравітаційних хвиль на дрібній воді. Виведення нелінійного рівняння Шредингера для гравітаційних хвиль на глибокій воді. Модель Френкеля-Конторової для дислокацій і краудіонів.	6

5.	Лінійні і нелінійні закони дисперсії. Дисперсія нелінійних хвиль. Нестійкість нелінійних хвиль стаціонарного профілю. Критерій Лайтхілла. Модуляційна нестійкість нелінійних хвиль. Асимптотичні методи для нелінійних хвиль.	6
6.	Солітони рівняння КдФ і Буссінеска. Солітони модифікованих рівнянь КдФ і Буссінеска. Солітони нелінійного рівняння Клейна-Гордона. Солітони нелінійного рівняння Шредінгера.	6
7.	Квазікласична трактовка солітонів згинаючої. Солітони в неінтегровних системах. Багатовимірні солітони нелінійного рівняння Шредінгера. Квазікласична трактовка багатовимірних солітонів.	6
8.	Системи з дискретно і безперервно виродженими основними станами. Одновимірні топологічні солітони: кінки, дислокації та доменні границі. Вихорі в гідродинаміці, магнетиках та надплинних системах. Топологічні характеристики багатовимірних топологічних солітонів. Двовимірні магнітні скірміони в магнетиках з взаємодією Дзялошинського. Тривимірні скірміони (хопфіони).	6
9.	Динамічний хаос і його характеристики. Прості сценарії хаосу: гомоклінічні структури, дивні атрактори, хаотичні гамільтонові системи. Солітонний хаос.	6
10.	Експериментальне спостереження нелінійних поверхневих пружних хвиль. Експериментальне дослідження магнітних солітонів і булітів. Експерименти з оптичними солітонами. Солітони в надплинному гелії. Експерименти з магнітними вихорями, доменними границями і скірміонами	6
11.	Одновимірні дискретні моделі Фермі-Паста-Улама. Солітонні розв'язки нелінійних рівнянь з квадратичною і кубічною нелінійністю. Дискретні бризери в $\beta$ -моделі Фермі-Паста-Улама. Метастабільність довгоживучих дискретних бризерів і процеси їх розпаду.	6
12.	Нелінійні дискретні моделі кристалів зі складною структурою. Фотонні кристали. Фотоннокристалічні хвильоводи. Одновимірні оптичні решітки атомів в стані конденсату Бозе-Ейнштейна. Нелінійні ґратки з нелокальною міжатомною взаємодією. Нелінійні ґратки типу Кроніґа-Пенні.	6
13.	Нелінійні ґратки і їх квантові аналоги. Класична і квантова дискретні моделі Абловіца-Ладіка. Інтеграл руху і квазікласичне квантування солітону Абловіца-Ладіка. Гамільтонові рівняння для параметрів динамічного солітону. Блохівські осциляції дискретного солітона в однорідних полях.	6
14.	Урахування вищої дисперсії у довгохвильовій динаміці дискретних моделей. Регуляризовані нелінійні рівняння із частинними похідними. Солітони, які вкладені у суцільний спектр. Формування комплексів топологічних солітонів. Безвипромінювальний рух і стійкість солітонних комплексів.	6
	Всього:	<b>84</b>

## 5. Методи навчання

**МН1 – Лекції.** Лекційний матеріал охоплює центральні та найбільш складні проблеми сучасної теоретичної фізики конденсованого стану. Простіші питання, що добре висвітлені в літературі, виносяться на самостійне вивчення.

**МН2 – Семінарські заняття.** Семінарські заняття передбачають самостійне вивчення аспірантами за завданням викладача окремих питань і тем лекційного курсу з наочним оформленням матеріалу у вигляді реферату, доповіді, повідомлення тощо. Семінарські заняття дають змогу викладачам ближче познайомитися з аспірантами, донести до них необхідну інформацію, а відтак перевірити, як вони засвоїли її, як користуються нею в навчальній і науковій роботі. Викладач має змогу враховувати теоретичну і практичну підготовку аспіранта, його індивідуальні особливості і здібності, що зумовлює підвищення рівня підготовки кожного аспіранта.

**МН4 – Самостійна робота.** Робота здобувачів носить в основному самостійний характер. Вони самостійно роблять пошук наукової літератури і опрацьовують її, консультуючись з викладачем. Таким чином вони удосконалюють набуті раніше навички роботи з літературою за фахом. Основна увага приділяється формуванню та засвоєнню базових знань в галузі теоретичної фізики конденсованого стану та вмінню застосовувати їх до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

**МН3, МН5** – демонстрація презентацій, використання засобів мультимедіа, дистанційні заняття з використанням комп'ютерних засобів.

## 6. Методи діагностики знань

### ФОРМИ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ (ФО)

**ФО1** – відвідування лекцій та творчий підхід в процесі наукового пошуку (20 балів);

**ФО2** – самостійна робота, опрацювання літератури та електронних джерел за темою дослідження (20 балів);

**ФО4** – відповідь на семінарі та використання сучасних інформаційних технологій при підготовці відповіді (20 балів);

**ФО5** – робота в команді при виконанні завдань самостійної роботи та на семінарі (5 балів);

**ФО6, ФО8, ФО9, ФО10** – підготовка та оформлення реферату та презентації, використання у доповіді прикладів реальних фізичних об'єктів, що пов'язані з дисертаційним дослідженням (20 балів).

Екзамен (15 балів)

Всього: 100 балів.

### Шкала оцінювання

Сума балів	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
80-89	добре	
70-79		
60-69	задовільно	
50-59		
1-49	незадовільно	не зараховано

## 7. Критерії оцінювання результатів навчання

Кількість балів	Критерії оцінювання
90-100	У відповіді повністю розкрито зміст питання. Матеріал викладено логічно, аргументовано, мова є грамотною, науковий стиль викладення матеріалу, вільне володіння термінологічним апаратом дисципліни. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що входить до навчальної програми, та продемонстровано високі практичні навички.

75-89	Відповідь досить повно розкриває зміст питання або розкриває основні (найважливіші) аспекти у запитанні, слухач володіє термінологічним апаратом дисципліни. У викладеному матеріалі слухач має помилки із аргументацією відповіді, недостатня логічність та послідовність викладення матеріалу. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, та середній рівень володіння практичним матеріалом.
60-74	Відповідь на контрольне питання є неповною, розкриває тільки деякі аспекти навчального матеріалу. Слухач припускається помилок у використанні термінології навчальної дисципліни. Рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, додатковим та практичним матеріалом є середнім.
35-59	У відповіді допущено суттєві помилки, які свідчать про незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; слухач слабо володіє термінологією дисципліни.
1-34	Відповідь практично відсутня, слухач демонструє незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; не володіє термінологією

## 8. Навчально-методичне забезпечення

На початку семестру здобувачі отримують:

1. Робочу програму, що містить перелік тем, список рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів, критерії та шкалу оцінювання; контрольні запитання до іспиту;
2. Пакет літератури, що містить основні підручники, навчальні та методичні посібники в електронній формі (формати .pdf та .djvu),

## 9. Питання до заліку/екзамену

1. Намалювати фазовий портрет осцилятора Дюфінга.
2. Намалювати фазовий портрет осцилятора Ван дер Поля.
3. Намалювати фазовий портрет математичного маятника.
4. Знайти нелінійний зсув частоти осцилятора Дюфінга з квадратичною нелінійністю в резонансному наближенні.
5. Знайти перші два члени нелінійного зсуву частоти маятника Дюфінга..
6. Намалювати поверхню потенційної енергії двох зв'язаних різних маятників Дюфінга.
7. Знайти точку біфуркації двох зв'язаних осциляторів Дюфінга і описати процес біфуркації.
8. Описати всі стаціонарні стани двох зв'язаних ротаторів в моделі DSTM.
9. Знайти стаціонарні стани двох зв'язаних осциляторів в моделі Абловіца-Ладіка.
10. Вивести динамічне рівняння ланцюжка класичних магнітних моментів з урахуванням магнітної анізотропії обміну.
11. Вивести динамічне рівняння ланцюжка зв'язаних математичних маятників.
12. Довгохвильове наближення в теорії нелінійних ланцюжків. Сильнодиспергуючі і слабодиспергуючі системи.
13. Вивести рівняння КдФ для коливання нелінійного ланцюжка.
14. Вивести рівняння Буссінеска для коливання нелінійного ланцюжка.
15. Фазова та групова швидкості хвиль. Дисперсія хвиль. Нелінійна дисперсія.
16. Знайти нелінійний закон дисперсії рівняння Буссінеска
17. Знайти нелінійний закон дисперсії рівняння КдФ.
18. Явище перекидання фронту хвиля на прикладі рівняння КдФ.
19. Вивести рівняння Буссінеска для нелінійних гравітаційних хвиль при малій глибині.
20. Модель Гросса-Пітаєвського і виведення рівняння Гросса-Пітаєвського.
21. Модель Ліба і виведення нелінійного рівняння Шредінгера для одновимірного Бозе-газу з  $\delta$  – образним потенціалом взаємодії.
22. Квазікласичний підхід до нелінійного рівняння Шредінгера. Інтеграли руху.

23. Виведення нелінійних еволюційних рівнянь з нелінійного закону дисперсії.
24. Критерій стійкості нелінійних хвиль стаціонарного профілю.
25. Хвилі конденсату нелінійного рівняння Шредінгера. Боголюбівський спектр.
26. Солітони рівняння КдФ.
27. Солітони рівняння Буссінеска.
28. Зв'язок рівнянь КдФ и мКдФ і їх розв'язків. Перетворення Міури.
29. Солітони згинаючої на прикладі нелінійного рівняння Шредінгера.
30. Солітони різного типу синусоїдального рівняння Гордона.
31. Магнітні солітони рівняння Ландау-Ліфшиця.
32. Солітони згинаючої в нелінійних неінтегровних рівняннях. Приклад нелінійного рівняння Клейна-Гордона.
33. Темні солітони ненульового вакууму нелінійного дефокусуєчого рівняння Шредінгера. Солітони в надплинному гелії.
34. Солітони Ахмедієва і Кузнецова.
35. Знайти чисельно за допомогою Mathematic або Maple двовимірні солітони нелінійного рівняння Шредінгера.
36. Знайти чисельно за допомогою Mathematic або Maple тривимірні солітони нелінійного рівняння Шредінгера.
37. Вихорові збудження рівняння Гросса-Пітаєвського.
38. Знайти чисельно за допомогою Mathematic або Maple вихорові розв'язки нелінійного рівняння Гросса-Пітаєвського.
39. Скірміони в феромагнетиках з взаємодією Дзялошинського.
40. Знайти чисельно за допомогою Mathematic або Maple скірміонні розв'язки рівняння Ландау-Ліфшиця.
41. Особливі точки і фазові траєкторії системи Лоренца в тривимірному фазовому просторі.
42. Знайти чисельно за допомогою Mathematic або Maple спектр нелінійних коливань двох лінійно зв'язаних осциляторів Дюфінга.
43. Прості і складні кристалічні решітки. Решітки Браве. Сингонії.
44. Поняття оберненої решітки і приведені зони Бріллюена.
45. Використання рентгенівських променів для встановлення структури кристала.
46. Рівняння малих коливань. Закон дисперсії стаціонарних коливань і його загальний аналіз.
47. Власні коливання кристала і спектр значень квазіхвильового вектора. Циклічні умови Борна-Кармана.
48. Коливання одновимірного кристала і ланцюжків атомів кінцевої довжини.
49. Нормальні координати коливань кристала. Функція Гамільтона кристала.
50. Основні поняття і рівняння теорії пружності та довгохвильове наближення і макроскопічні рівняння для поля зміщень.
51. Малі коливання лінійного ланцюжка та коливання сильно анізотропного кристала.
52. Аналіз закону дисперсії коливань складної решітки. Оптичні коливання.
53. Оптичні коливання одновимірного двоатомного кристала.
54. Молекулярні кристали і перетин акустичних и оптичних спектрів.
55. Поверхні постійної частоти і густина коливань кристала.
56. Густина коливань низьковимірних кристалів і особливості ван Хова.
57. Функція Гріна рівняння коливань і її зв'язок з густиною коливань.
58. Гамільтоніан кристала і квантування малих коливань.
59. Основний стан кристала і термодинаміка газу фононів.
60. Умови стійкості кристала, параметр де Бура і квантові кристали.
61. Нелінійність коливань кристала, ефективний гамільтоніан взаємодії і процеси розпаду фононів.
62. Квантово-механічне визначення функції Гріна.

63. Корелятор зміщень і середній квадрат зміщення атома.
64. Непружна дифракція на кристалі і відновлення закону дисперсії коливань.
65. Локалізація коливань поблизу ізольованого ізотоп-дефекту. Функція Гріна для кристала з дефектами.
66. Локальні коливання поблизу двовимірного дефекта. Дислокації і дисклінації.
67. Знаходження розв'язку рівняння Буссінеска для надзвукового солітона в ангармонічного кристалі.
68. Дискретна модель Френкеля-Конторової для краудіонів в кристалі і рівняння синус-Гордон.
69. Розв'язок континуального рівняння синус-Гордон методом Хіроти. Двосолітонні розв'язки і бризер.
70. Солітон-кінк як частинка в одновимірному кристалі і малі коливання в кристалі, що містить краудіон.
71. Однопараметричні дискретні солітони решіток Тоди і Хіроти.
72. Дискретні бризери решітки Хіроти і їх квазікласичні спектри.



## 10. Рекомендована література

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика, М.: Наука, 1965. – 203 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика, М.: Наука, 1986. – 730 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости, М.: Наука, 1987. – 245 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика, М.: Наука, 1963. – 702 с.
5. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки, М.: Наука, 1972. – 280 с.
6. Косевич А.М. Теория кристаллической решетки. Физическая механика кристаллов, Харьков: Вища школа, 1988. – 304 с.
7. Kosevich A.M. The Crystal Lattice. Phonons, Solitons, Dislocations, Superlattices, Weinheim: WILEY-VCH, 2005. – 343 p.
8. Косевич А. М. Механіка кристалічної ґратки, Харків: Акта, 2006. – 305 с.
9. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э., Теория колебаний, М.: ФМЛ, 1959. – 915 с.
10. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания, М.: Наука, 1987. – 424 с.
11. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н., Введение в нелинейную механику, М.: РХД, 2004. – 350 с.
12. Блэкьер О., Анализ нелинейных систем, М.: Мир, 1969. – 400 с.
13. Найфэ А., Введение в методы возмущений, М.: Мир, 1984. – 535 с.
14. Уизем Дж., Линейные и нелинейные волны, М.: Мир, 1977. – 622 с.
15. Рабинович М.И., Трубецков Д.И., Введение в теорию колебаний и волн, М.: Наука, 1984. – 430 с.
16. Борисов А.Б. Начала нелинейной динамики, Екатеринбург, 2010. – 407 с.
17. Лэм Дж.Л., Введение в теорию солитонов, М.: Мир, 1983. – 294 с.
18. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х., Солитоны и нелинейные волновые уравнения, М.: Мир, 1988. – 794 с.
19. Абловиц М., Сигур Х., Солитоны и метод обратной задачи рассеяния, М.: Мир, 1987. – 477 с.
20. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике, М.: Мир, 1989. – 323 с.
21. Тода М. Теория нелинейных решеток, М.: Мир, 1982. – 262 с.
22. Косевич А.М., Ковалев А.С., Введение в нелинейную физическую механику, Киев: Наукова думка, 1989. – 300 с.
23. Косевич А.М., Иванов Б.А., Ковалев А.С. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны, Киев: Наукова думка, 1983. – 192 с.
24. Борисов А.Б. Киселев В.В. Нелинейные волны, солитоны и локализованные структуры в магнетиках, т.1, Квазиодномерные магнитные солитоны, Екатеринбург, 2009. – 510 с.
25. Борисов А.Б. Киселев В.В. Нелинейные волны, солитоны и локализованные структуры в магнетиках, т.1, Топологические солитоны, Екатеринбург, 2011. – 415 с.
26. Шамсутдинов М.А., Ломакин И.Ю., Назаров В.Н. и др., Ферро- и антиферромагнитодинамика, Нелинейные колебания, волны и солитоны, М.: Наука, 2009. – 420 с.
27. Ахмедиев Н.Н., Анкевич А. Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки, М.: ФМЛ, 2003. – 304 с.
28. Ахмедиев Н., Анкевич А. Диссипативные солитоны М.: ФМЛ, 2008. – 504 с.
29. Kivshar Yu.S., Agraval G.P., Optical solitons, Academic press, Amsterdam, 2003, 540 p.
30. Braun O.M., Kivshar Yu.S., The Frenkel-Kontorova model, Springer, Berlin, 2004, 446 p.
31. Manton N., Sutcliffe P., Topological solitons, Cambridge University Press, 2004, 492 p.
32. Kevrekidis P.G., Frantzikakis D.J., Carretero-Gonzales R., The Defocusing Nonlinear Schrodinger equation, Philadelphia, SIAM, 2015, 425 p.

33. Boling Guo, Shijin Ding, Landau-Lifshitz equation, World Scientific, Singapore, 2008, 403 p.
34. Osborn A.R. Nonlinear Ocean Waves, Academic Press, Amsterdam 2010, 900 p.
35. Kartashov Y.V., Malomed B.A., Torner L., Solitons in nonlinear lattice, Rev. Mod. Phys., v.83, 2011, 247-305.
36. Anderson J.O., Theory of the weakly interacting Bose-gas, Rev. Mod Phys., v.76,2004, 599-639.
37. Nagaosa N., Tokura Y., Topological properties and gynamocs of magnetic skermions, Nature nanotechnology, v.8, 2013, 899-911.
38. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S., Spintronics: Fundamentals and applications, Rev. Mod. Phys., v.76, 2004, 323-386.
39. Lapine M., Shadrivov I.V., Kivshar Yu.S., Nonlinear metamaterials, Rev. Mod. Phys., v.86, 2014, 1093-1117.
40. Flach S. , Gorbach A.V., Discrete breathers – Advances in theory and applications, Phys. Rep., v. 467, 2008, 1-116.

### **Інтернет-ресурси**

<https://www.taylorfrancis.com/books/9780203647417> – Encyclopedia of Nonlinear Science – Енциклопедія нелінійної науки.

<https://www.routledge.com/Encyclopedia-of-Nonlinear-Science-1st-Edition/Scott/p/book/9781138012141>

<http://www.ma.hw.ac.uk/solitons/> – School of Mathematical and Computer Sciences, Heriot-Watt University Edinburgh, Scotland – Школа математичних і комп'ютерних наук, Університет Геріот-Ватт, Единбург, Шотландія.

<https://physics.anu.edu.au/nonlinear/> – Nonlinear Physics Centre, Australian National University, Canberra, Australia – Центр нелінійної фізики, Австралійський національний університет, Канберра, Австралія.

[https://www.ibs.re.kr/eng/sub02\\_03\\_08.do](https://www.ibs.re.kr/eng/sub02_03_08.do) – Center for Theoretical Physics of Complex Systems, Institute for Basic Science, Daejeon, South Korea – Центр теоретичної фізики складних систем, Інститут фундаментальної науки, Геджон, Південна Корея.

<https://www.itp.ac.ru> – Інститут теоретичної фізики ім. Л.Д.Ландау РАН, Черногловка, РФ.

<http://bitp.kiev.ua/> – Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна.