

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Заступник директора з наукової роботи  
  
В. В. Давидовський  
« 5 » 07 2023 р.



**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ**

***ФІЗИКА НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ***

**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** доктор філософії

**Галузь знань:** 10 - Природничі науки

**Спеціальність :** 104 – Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.

**Статус курсу:** фаховий (вибірковий)

**Київ 2023**

**Фізика неідеальної плазми: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2023 . - 44 с.**

**Укладач:** Порицький П.В., кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Ухвалено на засіданні Вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України

протокол № 6 від “ 5 ” липня 2023 р.

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ**  
***ФІЗИКА НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ***

**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** *доктор філософії*

**Галузь знань:** *10 - Природничі науки*

**Спеціальність :** *104 – Фізика та астрономія*

**Освітня програма:** *Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.*

**Статус курсу:** *фаховий (вибірковий)*

## I. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Програма з курсу «**Фізика неідеальної плазми**» відповідає навчальному плану підготовки аспірантів за спеціальністю **104 – Фізика та астрономія** (галузь знань: **10 - Природничі науки** ), що здобувають освітньо-кваліфікаційний рівень доктора філософії на відповідній освітній програмі ІЯД НАН України.

Курс «**Фізика неідеальної плазми**» є необхідною складовою є складовою вибіркових навчальних дисциплін циклу професійної та практичної підготовки докторів філософії за спеціальністю **104 – Фізика та астрономія**, напрям підготовки: Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.

Він дає можливість ознайомити аспірантів з понятійним апаратом фізики неідеальної плазми, властивостями неідеальних класичних та квантових середовищ, закономірностями процесів, що мають місце за участі частинок в неідеальній плазмі, їх колективною взаємодією, теоретичними методами опису таких явищ та розрахунку вимірюваних величин.

Курс «**Фізика неідеальної плазми**» викладається на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі та розрахований на 12 навчальних тижнів (по 4 ауд. год. щотижня; перший тиждень занять – лекційний). Вивчення курсу передбачає аудиторну (лекції – 32 год.; практичні заняття – 16 год.; консультація – 2 год.) і самостійну роботу (70 год.). Загальна кількість годин, відведених на опанування дисципліни – 120 (4 кредити ЄКТС).

**Мета** навчальної дисципліни - формування у здобувачів компетентностей у галузі фізики та астрономії, ознайомлення аспірантів з основними положеннями фізики неідеальної плазми, методами теоретичного опису явищ в неідеальних плазмових середовищах, та засвоєння методів розрахунку вимірюваних фізичних величин, що характеризують процеси в неідеальній плазмі.

**Предмет** навчальної дисципліни – класична та квантова статистична фізика неідеальної плазми.

**Завдання** – сформуванню у аспірантів базові знання про термодинамічні характеристики та властивості неідеальної плазми, про взаємодії, про процеси, що мають місце за участі заряджених частинок в неідеальній плазмі, сформуванню вміння теоретичного опису систем заряджених частинок та їх взаємодії, розрахунку вимірюваних величин, що їх характеризують.

### **Структура курсу**

У результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен:

**Знати:** Основні поняття фізики неідеальної плазми, типи частинок та їх взаємодій в плазмі, їх характеристики. Методи теоретичного опису властивостей заряджених частинок та процесів їх взаємодії в плазмі. Методи розрахунку вимірюваних фізичних величин, що характеризують процеси в неідеальних плазмових середовищах, в тому числі з використанням діаграмної техніки Фейнмана. Основи класичної та квантової статистичної теорії систем заряджених частинок.

**Вміти:** Описувати можливі процеси за участю заряджених частинок в плазмі. Розраховувати основні термодинамічні характеристики неідеальних плазмових середовищ. Розраховувати характеристики процесів взаємодії заряджених частинок в плазмі. Використовувати в розрахунках закони збереження та діаграмну техніку Фейнмана. Орієнтуватися у доборі спеціальної сучасної наукової літератури та самостійно працювати з нею.

**Місце дисципліни** (в структурно-логічній схемі підготовки фахівців відповідного напрямку). Вибіркова навчальна дисципліна «**Фізика неідеальної плазми**» є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «доктор філософії». Система знань, отримана при вивченні даного курсу, є необхідною для вільного ознайомлення з науковою літературою та при виконанні відповідних кваліфікаційних робіт.

**Зв'язок з іншими дисциплінами.** При вивченні дисципліни «**Фізика неідеальної плазми**» використовуються знання та вміння, набуті аспірантами під час вивчення курсів загальної фізики, електродинаміки, атомної фізики, статистичної фізики, квантової механіки, основ фізики плазми.

## Компетентності

**Інтегральна компетентність (ІК):** Здатність розв'язувати комплексні проблеми в галузі професійної та/або дослідницько-інноваційної діяльності у сфері фізики, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань та/або професійної практики. Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми у галузі управління та адміністрування, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань та/або професійної практики, застосовувати новітні методології наукової та педагогічної діяльності, здійснювати власні наукові дослідження.

**Загальні компетентності (ЗК):**

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК03. Здатність розв'язувати комплексні наукові проблеми на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням професійної етики та академічної доброчесності.

**Спеціальні (фахові) компетентності (СК):**

- СК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та
- СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.
- СК03. Здатність представляти та обговорювати результати своєї науково-дослідницької роботи державною мовою, а також англійською мовою чи одною з офіційних мов Європейсько Союзу, в усній та в письмовій формі, опрацьовувати наукову літературу з фізики та/або астрономії ефективно використовувати нову інформацію з різних джерел.
- СК05. Здатність ініціювати, розробляти та реалізовувати науково-дослідницькі, розробницькі та інноваційні проекти у сфері фізики та/або астрономії, планувати й організовувати роботу науково-дослідницьких, розробницьких та інноваційних колективів.
- СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

### **Програмні результати навчання**

- РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.
- РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.
- РН06. Планувати і виконувати прикладні та/або фундаментальні дослідження фізики та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних методів, методик, технологій, інструментів та обладнання, з дотриманням норм академічної етики, критично аналізувати результати наукових досліджень у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми; готувати проектні пропозиції щодо фінансування наукових досліджень та/або розробницьких і інноваційних проектів.
- РН03. Вільно презентувати та обговорювати державною мовою, а також англійською мовою чи одною з офіційних мов Європейського Союзу, результати наукових досліджень, фундаментальні та прикладні проблеми фізики та/або астрономії, публікувати результати наукових досліджень у наукових виданнях, що індексуються у базах Scopus та WoS Core Collection.
- РН04. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичних і

експериментальних досліджень, математичного моделювання, комп'ютерного експерименту, а також наявні літературні дані.

РН05. Розробляти моделі процесів і систем у фізиці та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямках, використовувати їх у науково-дослідницькій діяльності для отримання нових знань та/або створення розробок та інноваційних продуктів.

РН07. Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи.

РН09. Глибоко розуміти загальні принципи та методи природничих наук, а також методологію наукових досліджень, місце фізики в системі наукових знань як методологічної основи природничих, інженерних наук та технологій; застосувати їх у власних дослідженнях у сфері фізики та/або астрономії та у викладацькій діяльності.

## Політика та контроль

### Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- правила відвідування занять: заняття проводяться відповідно до розкладу згідно із правилами встановленими [Положенням про організацію освітнього процесу в Інституті ядерних досліджень НАН України](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/created_inet.pdf). ([http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/created\\_inet.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/created_inet.pdf)), присутність на заняттях є добровільним і не допускається примушування до будь-яких дій в навчальному процесі без особистої згоди аспіранта. Відповідно до робочої навчальної програми даної дисципліни, бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях відповіді до [Уніфікованої система оцінювання навчальних досягнень аспірантів](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/sys_test.pdf). ([http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/sys\\_test.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/sys_test.pdf)).
- правила поведінки на заняттях: аспірант має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені робочою навчальною програмою дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Інституту здійснюється за умови вказівки викладача;
- політика дедлайнів та перескладань: якщо аспірант не виконував модульні контрольні роботи (без поважної причини), то його результат оцінюється у 0 балів. Перескладання передбачено у разі поважних причин;
- політика щодо академічної доброчесності: [Положення про академічну доброчесність працівників та здобувачів вищої освіти в Інституті ядерних досліджень НАН України](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/pol_dobrochesnist.pdf) ([http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/pol\\_dobrochesnist.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/aspirant/pol_dobrochesnist.pdf)) встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в Інституті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни ;
- при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

## II. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№	Назва теми	Кількість годин				
		Всього	Лекцій	Практичних занять	Самостійна та індивідуальна робота	Консультації
	<b>Розділ (змістовний модуль) 1.</b> Класична неідеальна плазма	-	-	-	-	-
	<b>Тема 1.</b> Вступ. Поняття про неідеальну плазму	4	2	-	2	-
	<b>Тема 2.</b> Основні методи статистичної механіки заряджених частинок	5	2	-	3	-
	<b>Тема 3.</b> Теорія Гіббса та ланцюжок ББІКІ .	7	2	-	5	-
	<b>Тема 4.</b> Статистичні розподілення Гіббса	9	2	2	5	-
	<b>Тема 5.</b> Теорія Дебая-Гюккеля	9	2	2	5	-
	<b>Тема 6.</b> Рівняння Орнштейна-Церніке для плазми	7	2	-	5	-
	<b>Тема 7.</b> Термодинаміка кулонівських систем	9	2	2	5	-
	<b>Тема 8.</b> Мікрополе в плазмі	9	2	2	5	-
	<b>Всього по розділу 1</b>	59	16	8	35	-
	<b>Розділ (змістовний модуль) 2.</b> Квантова неідеальна плазма					
	<b>Тема 9.</b> Основні поняття та методи квантової статистичної механіки заряджених частинок.	4	2	-	2	-
	<b>Тема 10.</b> Метод вторинного квантування.	5	2	-	3	-
	<b>Тема 11.</b> Метод температурних функцій Гріна.	9	2	2	5	-
	<b>Тема 12.</b> Термодинамічний потенціал. Ефективний потенціал та зв'язані стани	9	2	2	5	-
	<b>Тема 13.</b> Термодинамічний потенціал. Драбинкове наближення. Дискретний та неперервний спектри.	7	2	-	5	-
	<b>Тема 14.</b> Фізична та хімічна моделі неідеальної плазми	7	2	-	5	
	<b>Тема 15.</b> Процеси перенесення в неідеальній плазмі.	9	2	2	5	
	<b>Тема 16.</b> Критичні явища та фазові переходи в неідеальній плазмі	9	2	2	5	
	<b>Всього по розділу 2</b>	59	16	8	35	-
	<b>Іспит</b>	-	-	-	-	2
	<b>Всього</b>	120	32	16	70	2



## ЗМІСТ КУРСУ

### Розділ (змістовний модуль) 1. Класична неідеальна плазма

#### ТЕМА 1. Вступ. Поняття про неідеальну плазму.

Опис дисципліни. Мета і завдання курсу.

Визначення плазми. Плазма як четвертий стан речовини. Класифікація різновидів плазми. Склад плазми. Основні властивості плазми. Електронейтральність плазми. Ідеальні та неідеальні плазмові середовища. Кулонівський потенціал. Колективний характер взаємодії частинок в плазмі. Поле електричного заряду в плазмі. Дебаївський радіус. Кількість частинок в сфері Дебая. Критерії неідеальності плазми. Радіус Вігнера-Зейтца. Неідеальна плазма в лабораторії, навколишньому середовищі та у Всесвіті.

#### ТЕМА 2. Основні методи статистичної механіки заряджених частинок.

Основні поняття класичної статистичної механіки. Рівняння Гамільтона. Потенціали взаємодії. Функції Маєра. Закони збереження для класичних статистичних систем. Енергія, імпульс, момент імпульсу для класичних систем. Перетворення Галілея. Кінетична та потенціальна енергія статистичної системи. Необерненість процесів в гамільтонових системах. Хаос в динамічних системах. Основні поняття теорії ймовірностей та її застосування до статистичних систем. Середня величина. Функція розподілення. Кореляційна функція.

#### ТЕМА 3. Теорія Гіббса та ланцюжок ББГКІ .

Теорія Гіббса (загальні положення). Ієрархія статистичної теорії. Фазовий простір . Кореляційна сфера і термостат. Мікро- і макрорівень. Закони термодинаміки і статистичні закони. Малі параметри. Функція Гіббса (визначення та властивості). Умови послаблення кореляцій. Термодинамічна границя. Умовна функція розподілення. Повна та l-часткова функція Гіббса. Властивості l-часткових функцій. Перехід до термодинамічної границі. Ієрархія ББГКІ (Боголюбова-Борна-Гріна-Кірквуда-Івона). Рівняння Ліувілля. Закони збереження для замкненої ізольованої системи. Нескінченний ланцюжок ББГКІ. Граничні та початкові умови. Макроскопічні параметри. Рівняння балансу сил.

#### ТЕМА 4. Статистичні розподілення Гіббса.

Шляхи можливого перетворення рівнянь ланцюжка ББГКІ. Статистичні ансамблі. Мікροканонічний ансамбль. Канонічний ансамбль. Великий канонічний ансамбль. Розподілення Гіббса для відкритої системи. Розподілення Гіббса для закритої системи. Статистична сума.

Конфігураційний інтеграл. Характеристичні функції. Термодинамічні потенціали. Хімічний потенціал. Теорема Ван Хофа. Еквівалентність ансамблів.

#### **ТЕМА 5. Теорія Дебая-Гюккеля.**

Статистичний опис плазми (основні співвідношення). Адитивне наближення для потенціальної енергії. Потенціал взаємодії в плазмі. Бінарна функція розподілення. Повна кореляційна функція. Внутрішня енергія і тиск в плазмі. Електронеутральність плазми. Співвідношення Стіллінджера-Ловетта. Рівняння Пуассона. Рівняння Пуассона-Больцмана. Рівняння Дебая-Гюккеля. Потенціал в плазмі. Кулонівський логарифм. Рівняння стану для плазми. Поправки на неідеальність. Структурний фактор.

#### **ТЕМА 6. Рівняння Орнштейна-Церніке для плазми.**

Фундаментальна система двох рівнянь для функції розподілення. Кореляційні функції. Повна кореляційна функція. Пряма кореляційна функція. Брілж-функціонал. Рівняння Орнштейна-Церніке. Апроксимація брілж-функціонала. Гіперланцюгове наближення. Замкнення рівняння Орнштейна-Церніке. Наближення Перкуса-Йєвіка. Потенціал в плазмі. Термодинамічні характеристики плазми.

#### **ТЕМА 7. Термодинаміка кулонівських систем.**

Модельні кулонівські системи. Система кулонівських кульок. Потенціал в системі кулонівських кульок. Рівняння стану. Поправки на неідеальність для системи кулонівських кульок. Однокомпонентна плазма.

#### **ТЕМА 8. Мікрополе в плазмі.**

Атом (іон) в зовнішньому полі. Поняття про мікрополе в плазмі. Вплив мікрополя на статистичні характеристики плазми. Статистична сума атома (іона). Форм-фактор. Регуляризація статсуми. Ймовірність розподілення мікрополя в плазмі. Метод Баранже-Мозера. Інтеграл функції мікрополя та розкладення в ряд. Функція Гольцмарка. Механізми розширення спектральних ліній в плазмі. Профіль спектральної лінії.

### **Розділ (змістовний модуль) 2. Квантова неідеальна плазма**

#### **ТЕМА 9. Основні поняття та методи квантової статистичної механіки заряджених частинок.**

Рівняння Шрödінгера. Гамільтоніан і хвильова функція. Нормування хвильової функції. Середнє значення величини. Представлення Шрödінгера.

Представлення Гайзенберга. Дужки Пуассона. Квантовий аналог рівнянь Гамільтона. Квантовий аналог рівняння Ліувілля. Матриця густини. Замкнені та незамкнені системи. Шпур. Квантовий аналог ланцюжка ББГКІ. Квантове розподілення Гіббса. Рівняння Блоха. Квантова статистична сума. Велике канонічне розподілення. Наближення Гартрі-Фока. Наближення Томаса-Фермі. Теорія збурень. Представлення взаємодії. Оператор впорядкування. Статистична сума.

#### **ТЕМА 10. Метод вторинного квантування.**

Основні поняття методу вторинного квантування. Оператори знищення та народження. Співвідношення комутації. Представлення Шрьодінгера та Гайзенберга. Числа заповнення та енергія. Оператор теорії збурень. Теорема Віка. Оператор впорядкування. Статистичні середні. Незмінність шпура при циклічних переставленнях..

#### **ТЕМА 11. Метод температурних функцій Гріна.**

Термодинамічний потенціал. Метод Мацубари для квантових статистичних систем частинок. Запізніла та випереджувальна функції Гріна. Діаграмна техніка. Різновиди діаграм. Діаграми Голдстоуна та Фейнмана. Моментні діаграми. Топологічна еквівалентність діаграм. Перша та друга теореми Маєра для діаграм. Зв'язані та незв'язані діаграми. Доданки ряду теорії збурень. Внески від діаграм. Причинна функція Гріна. Розкладення в ряд Фур'є. Фур'є образ. Термодинамічна границя.

#### **ТЕМА 12. Термодинамічний потенціал. Ефективний потенціал та зв'язані стани.**

Правила побудови діаграм. Ланцюгові, драбинякові, кільцеві та обмінні діаграми. Термодинамічний потенціал і активність. Внески від кільцевих діаграм в плазмі. Взаємодія на далеких відстанях. Кулонівський та ефективний потенціал. Внески від обмінних діаграм. Малі обмінні ефекти. Термодинамічний потенціал від кільцевих та обмінних діаграм. Квантові поправки до рівняння стану. Зв'язані стани.

#### **ТЕМА 13. Термодинамічний потенціал. Драбинкове наближення.**

##### **Дискретний та неперервний спектри.**

Драбинкове наближення. Багаторазова взаємодія та екранування в плазмі. Внески від драбинкових та ланцюгових діаграм. Загальна формула для обчислення термодинамічного потенціалу. Термодинамічні функції неідеальної квантової плазми. Активність. Квазікласичне наближення. Дискретний та неперервний спектри. Внески до статистичної суми. Вагові множники для статистичної суми.

#### **ТЕМА 14. Фізична та хімічна моделі неідеальної плазми.**

Фізична модель плазми (загальні поняття та визначення). Хімічна модель плазми (загальні поняття та визначення). Термодинамічний потенціал та термодинамічні функції неідеальної плазми. Плазма водню та воднеподібна плазма. Внески до термодинамічного потенціалу від неперервного та дискретного спектрів. Статсума Бріллюена-Планка-Ларкіна. Рівняння стану. Квантові поправки на неідеальність. Відхилення від дебаївської поправки. Особливості хімічної моделі плазми. Закон діючих мас. Рівняння Сага з поправками на неідеальність. Ефект «ідеальності» неідеальної плазми. Слабонеідеальна плазма.

#### **ТЕМА 15. Процеси перенесення в неідеальній плазмі.**

Поняття про процеси перенесення. Кінетичне рівняння Больцмана. Кінетичні рівняння систем частинок з короткодіючим потенціалом. Коефіцієнти перенесення нейтрального газу. Кінетичні рівняння для системи заряджених частинок. Інтеграл зіткнень Ландау. Інтеграл зіткнень Ленарда-Балеску. Ієрархія кінетичних рівнянь. Коефіцієнти перенесення плазми. Електронні коефіцієнти перенесення плазми. Ефективні коефіцієнти перенесення плазми. Метод функцій Гріна в кінетичній теорії. Часові кореляційні функції (ЧКФ). Метод ЧКФ для розрахунку коефіцієнтів перенесення. Розрахунок коефіцієнтів перенесення за допомогою функцій Гріна. Діаграмні внески першого, другого та третього порядків. Наближення Габбарда. Електропровідність плазми. Метод Кубо. Формула Гріна-Кубо. Ядерні реактори та енергетичні установки з неідеальною плазмою. Гаозопаливний реактор. Рідинно-металевий реактор. Транспортні властивості робочих середовищ.

#### **ТЕМА 16. Критичні явища та фазові переходи в неідеальній плазмі.**

Термодинамічна теорія фазових переходів. Умови термодинамічної (макроскопічної) рівноваги. Теплова рівновага. Механічна рівновага. Стійка та байдужа рівновага. Рівноважна двофазна система. Фазова діаграма. Формула Клапейрона-Клаузіуса.

Статистична теорія фазових переходів. Розподілення Гіббса для двофазної системи.

Кінетична теорія фазових переходів. Флуктуації. Зародок. Метастабільна фаза.

Критичні явища (фазові переходи другого роду). Критична точка. Кроссовер. Модель Ван-дер-Ваальса. Кулонівська модель. Спільна модель. Рівняння Сага з поправками на неідеальність.

Плазмовий фазовий перехід. Нестійкість плазмового переходу.  
 Поняття про теорію БКШ (Бардінга-Купера-Шифера). Рівняння стану для ідеального та неідеального бозе-газу. Конденсація Бозе-Ейнштейна.  
 Надплинність. Надпровідність.

## Література

### Основна

1. Кудрин Л.П. Статистическая физика плазмы. –М.: Атомиздат, -1974.-496с. ({Kudrin1974})
2. Крефт В.-Д., Кремп Д., Эбелинг В., Репке Г. Квантовая статистика систем заряженных частиц.:Пер. с англ.-М.: Мир.-1988.-408с. ({Kreft1988})
3. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. В двух томах. :Пер. с англ. –М.: Мир, 1978. ({Balescu1978})
4. Задачи по термодинамике и статистической физике /под ред..Ландсберга П. .: Пер. с англ. –М.Мир, 1974. -640с. ({Landsberg1974})
5. Майер Дж., Гепперт-Майер М. Статистическая физика. :Пер. с англ. — М.; Мир, 1980.-545с.({Mayer1980})
6. В. Эбелинг, В. Крефт, Д. Кремп Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твердом теле. :Пер. с англ. – М.Мир, 1979. -264с. ({Ebeling-Kreft1979})
7. Боголюбов Н.Н., Боголюбов Н.Н. (мл.) Введение в квантовую статистическую механику. — М., Наука, 1984. — 384 с. ({Bogolubov1984})
8. Ландау Л.Д. , Лившиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. (Серия: Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. *Теоретическая физика*, том 5) . -М.:Наука, 1976.-584с. ({Landau5})
9. Лившиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Часть 2. Теория конденсированного состояния (Серия: Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. *Теоретическая физика*, том 9) . -М.: Наука, 1979.-496с. ({Landau9})
10. Лившиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика (Серия: Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. *Теоретическая физика*, том 10).-М.:Наука, 1979.-528с. ({Landau10})
11. Ebeling W., Fortov V.E. , Filinov V. Quantum Statistics of Dense Gases and Nonideal Plasmas- Berlin, Heidelberg, NY.: Springer , 2017.-570p. {Ebeling-Fortov2017}
12. Kremp D., Schlanges M. , Kraeft W.-D.,with Bornath T. Quantum Statistics of Nonideal Plasmas. .- Berlin, Heidelberg, NY: Springer , 2005.-535p. ({Kremp20005})

13. Вакарчук І.О. Теорія зоряних спектрів.- Львів: Вид-во Львів. ун-ту, 2002.-359с. ({Wakarchuk2002})
14. Репке Г. Неравновесная статистическая механика.: Пер. с нем.- М.;Мир, 1990.-320с. ({Roerke1990})

#### Додаткова

1. Ахиезер Н.И., Пелетминский С.В. Методы статистической физики. — М., Наука, 1977. — 368 с. ({Akhiezer1977})
2. Абрикосов А. А., Горьков Л. П., Дзялошинский И. Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике. — М. : Физматгиз, 1962. — 444 с. ({Abrikosov1962})
3. Маттук Р. Фейнмановские диаграммы в проблеме многих тел. . :Пер. с англ. —М.Мир, 1969. -365с. ({Mattuk1969})
4. Уленбек Дж., Форд Дж. Лекции по статистической механике. :Пер. с англ. —М.Мир, 1965. -307с. ({UlenbeckFord1965})
5. Вакарчук І.О. Квантова механіка : підручник / 4-те вид., доп.-Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с. ({Wakarchuk2012})
6. Шмидт А.Б. Статистическая термодинамика классической плазмы. -М.: Энергоатомиздат, 1991.-116с. ({Schmidt1991})
7. Крокстон К. Физика жидкого состояния :Пер. с англ. —М.Мир, 1977. - 400с. ({Xroxton1977})
8. Мартынов Г.А. Классическая статистическая механика. Теория жидкостей.- Долгопрудный: Интеллект, 2011. — 328 с. ({Martynov2011})
9. Balzer K., Bonitz M. Nonequilibrium Green's Functions Approach to Inhomogeneous System.- Berlin, Heidelberg, NY.: Springer , 2013.-134p. ({BaltzerBonitz2013})
10. Bonitz M. Quantum Kinetic Theory – 2<sup>nd</sup>.-ed. –Berlin, Heidelberg, NY.: Springer , 2016.-412p. ({Bonitz2016})
11. Каули Ч. Теория звездных спектров. :Пер. с англ.- М.: Мир, 1974.-256с. ({Cowley1974})
12. Теплофизические свойства рабочих сред газофазного ядерного реактора / Под ред. Иевлева В.М. —М.: Атомиздат, 1980.-360с. ({Terloph1980})
13. Киттель Ч. Статистическая термодинамика.- М.: Мир, 1977.-328с. ({Kittel1977})

# НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

## ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

#### *ФІЗИКА НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ*

Галузь знань, спеціальність, освітня програма, освітньо- кваліфікаційний рівень	Організаційно-методична характеристика навчальної дисципліни	
	Академічна характеристика	Структура
10 – Природничі науки  104 – Фізика та астрономія  Освітня програма – Фізика (Теоретична фізика)  Доктор філософії	Рік навчання: 2 або 3 Семестр: 1 або 2 * Кількість годин на тиждень: 4 Статус курсу: <i>фаховий (вибірковий)</i> Кількість ECTS кредитів: 4  * дисципліна може викладатися на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі	Кількість годин: Загальна: 120 Лекції: 32 Практичні заняття: 16 Консультація 2 Самостійна робота: 70  Вид підсумкового контролю: іспит

Робоча програма складена для докторів філософії – Освітня програма Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.

Укладач: Порицький П.В., кандидат фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник

### III. ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

#### МЕТА ТА МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛЕКЦІЙ

Проведення лекційних занять націлено на донесення загальних знань та побудову теоретичних методів по дисципліні, на сприяння розвитку у аспірантів розумової діяльності і розширення світогляду.

#### *Розділ (змістовний модуль) 1. Класична неідеальна плазма*

##### **Заняття 1. Тема 1. Вступ. Поняття про неідеальну плазму.**

План.

1. Мета, завдання та структура курсу.
2. Визначення плазми. Класифікація різновидів плазми.
3. Поняття про неідеальні середовища.
4. Колективний характер взаємодії у плазмі.
5. Величини, що характеризують плазму.
6. Критерії неідеальності.

##### *Література*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
3. [11] {Ebeling-Fortov2017}
4. [16] {Roepke1990}
5. [Д6] {Schmidt1991}
6. [Д8] {Martynov2011}

##### **Заняття 2. Тема 2. Основні методи статистичної механіки заряджених частинок**

План.

1. Основні поняття класичної статистичної механіки.
2. Рівняння Гамільтона.
3. Закони збереження для класичних статистичних систем.
4. Перетворення Галілея. Кінетична та потенціальна енергія статистичної системи.
5. Хаос в динамічних системах.

##### *Література*

1. [3] ({Balescu1978})
2. [4] ({Landsberg1974})
3. [5] ({Mayer1980})
4. [7] ({Bogolubov1984})



5. [8] {Landau5}
6. [11] {Ebeling-Fortov2017}
7. [16] {Roepke1990}
8. [Д1] ({Akhiezer1977})
9. [Д4]({UlenbeckFord1965})
8. [Д8] {Martynov2011}
9. [Д13] {Kittel1977}

### **Заняття 3. Тема 3. Теорія Гіббса та ланцюжок ББГКІ.**

План.

1. Ієрархія статистичної теорії. Кореляційна сфера і термостат.
2. Функція Гіббса.
3. Термодинамічна границя.
4. Умовна функція розподілення. Повна та 1-часткова функція Гіббса.
5. Рівняння Ліувілля. Закони збереження для замкненої ізольованої системи.
6. Нескінченний ланцюжок ББГКІ.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [5] .({Mayer1980})
5. [7] ({Bogolubov1984})
6. [10] ({Landau10})
7. [14] ({Roepke1990})
8. [Д1] ({Akhiezer1977})
9. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
10. [Д8] ({Martynov2011})

### **Заняття 4. Тема 4. Статистичні розподілення Гіббса**

План.

1. Шляхи можливого перетворення рівнянь ланцюжка ББГКІ.
2. Статистичні ансамблі.
3. Розподілення Гіббса для відкритої системи.
4. Розподілення Гіббса для закритої системи.
5. Статистична сума. Характеристичні функції. Термодинамічні потенціали.
6. Теорема Ван Хова. Еквівалентність ансамблів.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [5] .({Mayer1980})
5. [7] ({Bogolubov1984})
6. [8] ({Landau5})
7. [14] ({Roepke1990})
8. [Д1] ({Akhiezer1977})
9. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
10. [Д8] ({Martynov2011})

### **Заняття 5. Тема 5. Теорія Дебая-Гюккеля .**

План.

1. Статистичний опис плазми. Адитивне наближення для потенціальної енергії. Потенціал взаємодії в плазмі.
2. Електронейтральність плазми.
3. Рівняння Пуассона-Больцмана. Рівняння Дебая-Гюккеля. Потенціал в плазмі.
4. Рівняння стану для плазми. Поправки на неідеальність.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [5] .({Mayer1980})
5. [7] ({Bogolubov1984})
6. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
7. [14] ({Roepke1990})
8. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
9. [Д6] ({Schmidt1991})
10. [Д8] ({Martynov2011})

### **Заняття 6. Тема 6. Рівняння Орнштейна-Церніке для плазми**

План.

1. Фундаментальна система двох рівнянь для функції розподілення.
2. Кореляційні функції.
3. Брідж-Функціонал.
4. Рівняння Орнштейна-Церніке та його замкнення. Гіперланцюгове наближення. Рівняння Перкуса-Йєвіка .
5. Потенціал в плазмі. Термодинамічні характеристики плазми.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})
4. [9] ({Landau9})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roepke1990})
7. [Д6] ({Schmidt1991})
8. [Д7] ({Xroxton1977})
9. [Д8] ({Martynov2011})

### **Заняття 7. Тема 7. Термодинаміка кулонівських систем.**

План.

1. Система кулонівських кульок.
2. Рівняння стану. Поправки на неідеальність.
3. Однокомпонентна плазма.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})
4. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roepke1990})
7. [Д6] ({Schmidt1991})
8. [Д8] ({Martynov2011})
9. [Д12] ({Teploph1980})

### **Заняття 8. Тема 8. Мікрополе в плазмі.**

План.

1. Атом (іон) в зовнішньому полі.
2. Статистична сума атома (іона). Форм-фактор.
3. Ймовірність мікрополя.
4. Функція Гольцмарка .
5. Механізми уширення спектральних ліній в плазмі.
6. Профіль спектральної лінії.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
3. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
4. [12] ({Kremp20005})
5. [13] ({Wakarchuk2002})

6. [Д6] ( {Schmidt1991} )
8. [Д8] ( {Martynov2011} )
8. [Д11] ( {Cowley1974} )
9. [Д12] ( {Teploph1980} )

## **Розділ (змістовний модуль) 2. Квантова неідеальна плазма**

### **Заняття 9. Тема 9. Основні поняття та методи квантової статистичної механіки заряджених частинок.**

План.

1. Рівняння Шрьодінгера.
2. Представлення Шрьодінгера..
3. Представлення Гайзенберга.
4. Матриця густини. Шпур.
5. Рівняння Блоха.
6. Квантове розподілення Гіббса. Велике канонічне розподілення.
7. Теорія збурень. Оператор впорядкування.

#### ***Література***

1. [1] ( {Kudrin1974} )
2. [2] ( {Kreft1988} )
3. [4] ( {Landsberg1974} )
4. [7] ( {Bogolubov1984} )
5. [11] ( {Ebeling-Fortov2017} )
6. [12] ( {Kremp20005} )
7. [13] ( {Wakarchuk2002} )
8. [Д2] ( {Abrikosov1962} )
9. [Д5] ( {Wakarchuk2012} )
10. [Д9] ( {BaltzerBonitz2013} )
11. [Д10] ( {Bonitz2016} )
12. [Д11] ( {Cowley1974} )

### **Заняття 10. Тема 10. Метод вторинного квантування.**

План.

1. Основні поняття методу вторинного квантування..
2. Оператори знищення та народження.
3. Представлення Шрьодінгера та Гайзенберга.
4. Числа заповнення та енергією
5. Оператор теорії збурень.
6. Теорема Віка.

#### ***Література***

1. [1] ( {Kudrin1974} )
2. [2] ( {Kreft1988} )

3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [12] ({Kremp20005})
7. [13] ({Wakarchuk2002})
8. [Д2] ({Abrikosov1962})
9. [Д5] ({Wakarchuk2012})
10. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
11. [Д10] ({Bonitz2016})
12. [Д11] ({Cowley1974})

### **Заняття 11. Тема 11. Метод температурних функцій Гріна.**

План.

1. Термодинамічний потенціал.
2. Запізніла та випереджувальна функції Гріна.
3. Метод Мацубари.
4. Діаграмна техніка.
4. Перша та друга теореми Маєра для діаграм.
5. Доданки ряду теорії збурень. Внески від діаграм.
5. Причинна функція Гріна. Розкладення в ряд Фур'є. Фур'є образ.

#### ***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Kreft1988})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [9] ({Landau9})
6. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
7. [12] ({Kremp20005})
8. [13] ({Wakarchuk2002})
9. [Д2] ({Abrikosov1962})
10. [Д5] ({Wakarchuk2012})
11. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
12. [Д10] ({Bonitz2016})
13. [Д11] ({Cowley1974})

### **Заняття 12. Тема 12. Термодинамічний потенціал. Ефективний потенціал та зв'язані стани.**

План.

1. Правила побудови діаграм.
2. Ланцюгові, драбинякові, кільцеві та обмінні діаграми.
3. Внески від кільцевих діаграм. Ефективний потенціал.
4. Внески від обмінних діаграм. Малі обмінні ефекти.

## 5. Зв'язані стани.

### *Література*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Kreft1988})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [9] ({Landau9})
6. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
7. [12] ({Kremp20005})
8. [Д2] ({Abrikosov1962})
9. [Д3] ({Mattuk1969})
10. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
10. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
11. [Д10] ({Bonitz2016})

## **Заняття 13. Тема 13. Термодинамічний потенціал. Драбинкове наближення. Дискретний та неперервний спектри..**

План.

1. Драбинкове наближення.
2. Загальна формула для обчислення термодинамічного потенціалу. Термодинамічні функції.
3. Квазікласичне наближення. Дискретний та неперервний спектри. Внески до статистичної суми.

### *Література*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Kreft1988})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [9] ({Landau9})
6. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
7. [12] ({Kremp20005})
8. [Д2] ({Abrikosov1962})
9. [Д3] ({Mattuk1969})
10. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
11. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
12. [Д10] ({Bonitz2016})

## **Заняття 14. Тема 14. Фізична та хімічна моделі неідеальної плазми.**

План.

1. Фізична модель плазми. Термодинамічний потенціал та термодинамічні функції.
2. Плазма водню та воднеподібна плазма. Внески до термодинамічного потенціалу від неперервного та дискретного спектрів.
2. Хімічна модель плазми. Закон діючих мас. Рівняння Сага з поправками на неідеальність.
3. Слабонеідеальна плазма.

### *Література*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [5] ({Mayer1980})
5. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
6. [10] ({Landau10})
7. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
8. [14] ({Roepke1990})
9. [Д8] ({Martynov2011})
10. [Д12] ({Terloph1980})

### **Заняття 15. Тема 15. Процеси перенесення в неідеальній плазмі.**

План.

1. Поняття про процеси перенесення.
2. Кінетичне рівняння Больцмана.
3. Кінетичні рівняння систем частинок з короткодіючим потенціалом.
4. Кінетичні рівняння для системи заряджених частинок.
5. Інтеграл зіткнень.
6. Коефіцієнти перенесення.
7. Ієрархія кінетичних рівнянь.
8. Часові кореляційні функції.
9. Метод функцій Гріна в кінетичній теорії.
10. Розрахунок коефіцієнтів перенесення за допомогою функцій Гріна.
11. Транспортні властивості робочих середовищ ядерних реакторів з неідеальною плазмою.

### *Література*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})
4. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roepke1990})
7. [Д8] ({Martynov2011})

8. [Д12] ({Терлоph1980})

**Заняття 16. Тема 16. Критичні явища та фазові переходи в неідеальній плазмі.**

План.

1. Термодинамічна теорія фазових переходів..
2. Статистична теорія фазових переходів.
3. Кінетична теорія фазових переходів.
4. Критичні явища (фазові переходи другого роду). Критична точка.
5. Плазмовий фазовий перехід.
6. Поняття про теорію БКШ (Бардінга-Купера-Шифера).

***Література***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [5] ({Mayer1980})
5. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
6. [10] ({Landau10})
7. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
8. [14] ({Roepke1990})
9. [Д8] ({Martynov2011})
10. [Д12] ({Терлоph1980})



## IV. ПЛАН ТА МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

### МЕТА ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Практичні заняття є сполучною ланкою між лекційними заняттями та самостійною роботою і мають на меті поглиблене засвоєння теоретичних понять, термінів і моделей з дисципліни та набуття практичних навиків розв'язання задач.

В процесі практичних занять з'ясовується ступінь засвоєння понятійно-термінологічного апарату та основних положень предмету, вміння розкривати конкретну тему, аналізувати і узагальнювати ключові питання курсу, робити числові оцінки, розв'язувати задачі.

Одним з важливих завдань проведення занять є отримання аспірантами навиків публічних виступів і дискусій.

### ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

*Передбачаються такі види аудиторної роботи:*

- розгляд і обговорення теоретичного матеріалу за переліком контрольних питань по відповідних темах лекційних занять та питань для самостійного опрацювання;
- проведення семінарів з публічними виступами та доповідями по рефератах, підготовлених студентами самостійно за рекомендованою тематикою;
- розв'язання задач аналітичного характеру;
- розв'язання задач обчислювального характеру;
- проведення колоквіумів по засвоєнню теоретичного матеріалу;
- виконання контрольних робіт за індивідуальним завданням;
- перевірка практичних завдань, виконаних студентами під час самостійної роботи;
- проведення консультацій з дисципліни;

#### **Практичне заняття 1. Тема 4. Статистичні розподілення Гіббса.**

Контрольні питання:

1. Мікроканонічне розподілення.
2. Канонічне розподілення.
3. Велике канонічне розподілення.
4. Інтеграл станів (конфігураційний інтеграл).
5. Велика статсума.
6. Функції Маєра.
7. Діаграми Маєра.
8. Техніка діаграм Маєра. Інтеграл і діаграми.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Класифікація різновидів діаграм.
2. Інтеграл і діаграми . Незвідний інтеграл.
3. Перша теорема Маєра для діаграм.
4. Друга теорема Маєра для діаграм.
5. Теорема множення для діаграм.

**Література:**

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})
4. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roepke1990})
7. [Д3] ({Mattuk1969})
8. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
9. [Д6] ({Schmidt1991})
10. [Д8] ({Martynov2011})
10. [Д12] ({Terloph1980})

**Практичне заняття 2. Тема 5. Теорія Дебая-Гюккеля.**

Контрольні питання:

1. Дебаївський радіус.
2. Електронейтральність плазми.
3. Критерії неідеальності.
4. Потенціал в плазмі.
5. Рівняння Сага-Еггерта для ідеальної плазми.
6. Рівняння Сага для неідеальної плазми. Дебаївські поправки.
7. Зниження потенціалу іонізації.
8. Статсума та її регуляризація.
9. Рівняння стану. Дебаївські поправки.
10. Потенціальна енергія і тиск в плазмі.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Взаємозв'язок критеріїв неідеальності.
2. Електронейтральність плазми. Співвідношення Стіллінджера-Ловетта.
3. Рівняння Сага для неідеальної плазми. Поправки на неідеальність.
4. Регуляризація статсуми.
5. Зниження потенціалу іонізації.
6. Рівняння стану. Поправки на неідеальність.

**Література:**

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})

4. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roepke1990})
7. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
8. [Д6] ({Schmidt1991})
9. [Д8] ({Martynov2011})
10. [Д12] ({Terloph1980})

### **Практичне заняття 3. Тема 7. Термодинаміка кулонівських систем.**

Контрольні питання:

1. Моделі кулонівських систем.
2. Система твердих кулонівських кульок.
3. Однокомпонентна плазма.
4. Потенціальна енергія і тиск для кулонівських систем.
5. Віріальне рівняння стану.
6. Віріальні коефіцієнти.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Однокомпонентна плазма.
2. Рівняння Маєра для статистичної системи.
3. Віріальне розкладення.
4. Віріальні коефіцієнти.
5. Віріальне рівняння стану для модельної кулонівської системи.

#### ***Література:***

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})
4. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roepke1990})
7. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
8. [Д6] ({Schmidt1991})
9. [Д8] ({Martynov2011})
10. [Д12] ({Terloph1980})

### **Практичне заняття 4. Тема 8. Мікрополе в плазмі.**

Контрольні питання:

1. Вплив мікрополя на атом (іон) в плазмі.
2. Вплив мікрополя на статистичні характеристики плазми.
3. Ймовірність мікрополя.
4. Розширення спектральних ліній.
5. Профіль спектральної лінії.

## 6. Функція Гольцмарка.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Нереалізація квантових рівнів в плазмі внаслідок впливу мікрополя.
2. Форм-фактор для статсуми.
3. Чинники розширення спектральних ліній в плазмі.
4. Профіль спектральної лінії. Функція Фойгта.

### *Література:*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Kreft1988})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [9] ({Landau9})
6. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
7. [12] ({Kremp20005})
8. [13] ({Wakarchuk2002})
9. [Д2] ({Abrikosov1962})
10. [Д5] ({Wakarchuk2012})
11. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
12. [Д10] ({Bonitz2016})
13. [Д11] ({Cowley1974})

## **Практичне заняття 5. Тема 11. Метод температурних функцій Гріна.**

Контрольні питання:

1. Метод Мацубари для квантових статистичних систем частинок.
2. Температурна функція Гріна. Діаграми Фейнмана.
3. Діаграмна техніка.
4. Внески від діаграм.
5. Причинна функція Гріна. Розкладення в ряд Фур'є. Фур'є образ.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Діаграми Голдстоуна та Фейнмана.
2. Моментні діаграми.
3. Різновиди діаграм.
4. Теореми Маєра для діаграм.

### *Література:*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Kreft1988})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [9] ({Landau9})
6. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
7. [12] ({Kremp20005})
8. [Д2] ({Abrikosov1962})
9. [Д3] ({Mattuk1969})

10. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
11. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
12. [Д10] ({Bonitz2016})

### **Практичне заняття 6. Тема 12. Термодинамічний потенціал. Ефективний потенціал та зв'язані стани.**

Контрольні питання:

1. Правила побудови діаграм.
2. Ефективний потенціал.
3. Внески від діаграм.
4. Обмінні ефекти.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Вплив умов електронейтральності плазми на діаграмні внески.
2. Квантові поправки до тиску.
3. Зв'язані стани.

*Література:*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Kreft1988})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [7] ({Bogolubov1984})
5. [9] ({Landau9})
6. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
7. [12] ({Kremp20005})
8. [Д2] ({Abrikosov1962})
9. [Д3] ({Mattuk1969})
10. [Д4] ({UlenbeckFord1965})
11. [Д9] ({BaltzerBonitz2013})
12. [Д10] ({Bonitz2016})

### **Практичне заняття 7. Тема 15. Процеси перенесення в неідеальній плазмі.**

Контрольні питання:

1. Кінетичне рівняння Больцмана.
2. Кінетичні рівняння систем частинок з короткодійним потенціалом.
3. Кінетичні рівняння для системи заряджених частинок.
4. Коефіцієнти перенесення.
5. Ієрархія кінетичних рівнянь.
6. Часові кореляційні функції.
7. Метод функцій Гріна в кінетичній теорії.

## 8. Розрахунок коефіцієнтів перенесення за допомогою функцій Гріна.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Інтегралі зіткнень.
2. Плазмові частоти.
3. Метод Чепмена-Енскога.
4. Метод Греда.
5. Діаграмні внески першого, другого та третього порядків.
6. Метод Кубо.
7. Ядерні енергетичні установки з неідеальною плазмою.
8. Транспортні властивості робочих середовищ ядерних реакторів з неідеальною плазмою.

### *Література:*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [5] .({Mayer1980})
4. [6] ({Ebeling-Kreft1979})
5. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
6. [14] ({Roeperke1990})
7. [Д8] ({Martynov2011})
8. [Д12] ({Teploph1980})

## **Практичне заняття 8. Тема 16. Критичні явища та фазові переходи в неідеальній плазмі**

Контрольні питання:

1. Статистична теорія фазових переходів.
2. Рівняння стану для ідеального та неідеального бозе-газу.
3. Конденсація Бозе-Ейнштейна.
4. Надплинність.
5. Надпровідність.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Віріальне рівняння стану для квантової системи частинок.
2. Теорія БКШ.
3. Рівняння стану для гелію.
4. Надплинність.
5. Надпровідність.

### *Література:*

1. [1] ({Kudrin1974})
2. [2] ({Balescu1978})
3. [4] ({Landsberg1974})
4. [5] ({Mayer1980})
5. [6] ({Ebeling-Kreft1979})

6. [10] ({Landau10})
7. [11] ({Ebeling-Fortov2017})
8. [14] ({Roepke1990})
9. [Д8] ({Martynov2011})
10. [Д12] ({Teploph1980})

## V. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

### МЕТА І ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Головна мета проведення самостійної роботи полягає у необхідності більш широкого огляду тематики курсу з використанням матеріалів підручників, періодичних видань, наукових праць, монографій з окремих питань дисципліни.

Важливою складовою самостійної роботи студентів є виконання індивідуальних робіт.

Виконання індивідуальних робіт має на меті:

- закріплення знань теоретичного курсу;
- набуття навичок опрацювання наукової літератури (монографій, наукових статей);
- напрацювання вмінь та навичок розв'язування фізичних задач;
- навчання ефективному використанню фізико-математичних довідників, енциклопедій (включно з on-line інформацією) і т. ін.

### ЗМІСТ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№ теми	Завдання	Література	Форма контролю
1	<p>Основні риси неідеальної плазми</p> <p>Кулонівський потенціал. Коллективний характер взаємодії частинок в плазмі</p> <p>Ідеальні та неідеальні плазмові середовища.</p> <p>Неідеальна плазма в природі, лабораторії, технологіях та виробництві</p>	3-5	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>



2	<p>Основні поняття класичної статистичної механіки.</p> <p>Функції Масра</p> <p>Гамільтонові системи</p> <p>Хаос в динамічних системах.</p> <p>Теорія ймовірностей та її застосування до статистичних систем. Середні величини</p> <p>Статистика Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака.</p>	3-5	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
3	<p>Теорія Гіббса . Ієрархія статистичної теорії.</p> <p>Термодинамічна границя.</p> <p>Функція Гіббса.</p> <p>Повна та 1-часткова функція Гіббса.</p> <p>Ієрархія ББГКІ</p> <p>Рівняння Ліувілля</p>	1-3; Д1	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
4	<p>Статистичні ансамблі.</p> <p>Статистична сума.</p> <p>Характеристичні функції.</p> <p>Термодинамічні потенціали.</p> <p>Теорема Ван Хова. Еквівалентність ансамблів.</p>	1,2; Д2,Д3	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

5	<p>Статистичний опис плазми</p> <p>Електронейтральність плазми. Співвідношення Стіллінджера-Ловетта.</p> <p>Рівняння Пуассона. Рівняння Пуассона-Больцмана. Рівняння Дебая-Гюккеля.</p> <p>Рівняння стану для плазми. Поправки на неідеальність.</p> <p>Структурний фактор.</p>	1,2; Д2,Д3	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
6	<p>Фундаментальна система двох рівнянь для функції розподілення.</p> <p>Кореляційні функції.</p> <p>Рівняння Орнштейна-Церніке.</p> <p>Брідж-функціонал.</p> <p>Апроксимація брідж-функціонала. Гіперланцюгове наближення.</p> <p>Замкнення рівняння Орнштейна-Церніке. Наближення Перкуса-Йєвіка.</p> <p>Термодинамічні характеристики плазми.</p>	1,2; Д2,Д3	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
7	<p>Моделі кулонівські системи. Система кулонівських кульок.</p> <p>Рівняння стану. Поправки на неідеальність для системи кулонівських кульок.</p> <p>Однокомпонентна плазма.</p>	1,2; Д2,Д3	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

8	<p>Атом (іон) в зовнішньому полі. Вплив мікрополя на статистичні характеристики плазми. Ймовірність розподілення мікрополя в плазмі. Метод Баранже-Мозера. Функція Гольцмарка.</p> <p>Механізми розширення спектральних ліній в плазмі.</p> <p>Профіль спектральної лінії.</p>	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..
9	<p>Рівняння Шрьодінгера Представлення Шрьодінгера. Представлення Гайзенберга Матриця густини. Рівняння Блоха. Квантова статистична сума. Наближення Гартрі-Фока. Наближення Томаса-Фермі .</p> <p>Теорія збурень. Представлення взаємодії. Оператор впорядкування.</p>		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..
10	<p>Основні поняття методу вторинного квантування. Оператори знищення та народження. Співвідношення комутації.</p> <p>Теорема Віка. Оператор впорядкування. Статистичні середні.</p>		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

11	<p>Термодинамічний потенціал</p> <p>Метод Мацубари для квантових статистичних систем частинок.</p> <p>Діаграмна техніка. Різновиди діаграм. Діаграми Голдстоуна та Фейнмана. Моментні діаграми. Топологічна еквівалентність діаграм.</p> <p>Перша та друга теореми Маєра для діаграм. Зв'язані та незв'язані діаграми.</p> <p>Доданки ряду теорії збурень. Внески від діаграм.</p> <p>Причинна функція Гріна. Розкладення в ряд Фур'є. Фур'є образ..</p>		<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..</p>
12	<p>Правила побудови діаграм. Ланцюгові, драбинякові, кільцеві та обмінні діаграми.</p> <p>Взаємодія на далеких відстанях. Кулонівський та ефективний потенціал.</p> <p>Квантові поправки до рівняння стану. Зв'язані стани.</p>		<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

13	<p>Драбинкове наближення. Багаторазова взаємодія та екранування в плазмі</p> <p>Термодинамічні функції неідеальної квантової плазми.</p> <p>Квазікласичне наближення. Дискретний та неперервний спектри.</p>		<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
14	<p>Фізична модель плазми. Хімічна модель плазми.</p> <p>Термодинамічний потенціал та термодинамічні функції неідеальної плазми.</p> <p>Плазма водню та воднеподібна плазма. Внески до термодинамічного потенціалу від неперервного та дискретного спектрів.</p> <p>Рівняння стану. Квантові поправки на неідеальність.</p> <p>Рівняння Саха з поправками на неідеальність.</p> <p>Слабонеідеальна плазма.</p>		<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

15	<p>Кінетичне рівняння Больцмана</p> <p>Кінетичні рівняння для системи заряджених частинок. Інтеграл зіткнень Ландау. Інтеграл зіткнень Ленарда-Балеску.</p> <p>Ієрархія кінетичних рівнянь.</p> <p>Коефіцієнти перенесення плазми.</p> <p>Метод функцій Гріна в кінетичній теорії. Часові кореляційні функції (ЧКФ).</p> <p>Розрахунок коефіцієнтів перенесення за допомогою функцій Гріна..</p> <p>Метод Кубо. Формула Гріна-Кубо</p> <p>Ядерні реактори та енергетичні установки з неідеальною плазмою..</p>		<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
16	<p>Термодинамічна теорія фазових переходів.</p> <p>Статистична теорія фазових переходів.</p> <p>Кінетична теорія фазових переходів.</p> <p>Критичні явища (фазові переходи другого роду). Критична точка.</p> <p>Рівняння стану для квантового ідеального та неідеального газу.</p> <p>Конденсація Бозе-Ейнштейна.</p> <p>Надплинність. Надпровідність.</p> <p>Плазмовий фазовий перехід.</p>		<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

### ОБСЯГ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№	Назва теми	Кількість годин
---	------------	-----------------

1.	<i>Підготовка до поточних практичних занять</i>	20
2.	<i>Виконання поточних практичних завдань</i>	20
3.	<i>Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури</i>	20
4.	<i>Індивідуальні консультації з викладачем</i>	10
	<b><i>ВСЬОГО</i></b>	<b>70</b>

### **Завдання (задачі, вправи) для самостійної роботи**

1. Розрахувати дебаївський радіус та число частинок в дебаївській сфері для плазми реальних об'єктів (за окремою вибірковістю).
2. Визначити за критеріями неідеальності чи є даний різновид плазми реальних об'єктів (за окремою вибірковістю) ідеальним чи неідеальним.
3. Розрахувати зниження потенціалу іонізація за абсолютною та відносною величиною для для плазми реальних об'єктів (за окремою вибірковістю).
4. Визначити зв'язок між коефіцієнтами рівняння стану у формі рівняння Ван-дер-Ваальса та віріального рівняння .
5. Визначити зв'язок між коефіцієнтами для різних форм віріального рівняння стану.
6. Визначити дебаївську поправку на неідеальність до тиску в абсолютному та відносному значеннях величин для рівняння стану для слабонеідеальної плазми .
7. Записати (повністю або частково) через кореляційні функції та/або функції Маєра діаграми Маєра, що входять до брідж-функціоналу.
8. Розв'язати задачу з відповідної тематики з задачника [ ].

### **Теми для рефератів та доповідей**

1. Статистичні ансамблі.
2. Теорема Маєра для діаграм.
- 3.
4. Функція Гольцмарка
5. Механізми розширення спектральних ліній в плазмі.
6. Профіль спектральної лінії.
7. Функції Фермі-Дірака в фізиці неідеальної плазми..
8. Слабонеідеальна плазма.
9. Хімічна модель плазми.
10. Рівняння Сага.

11. Властивості робочих середовищ ядерних реакторів (газопаливного, рідиннометалевого) з неідеальною плазмою.
12. Неідеальна плазма Сонця.
13. Кварк-глюонна плазма.
14. Неідеальна плазма нейтронної зірки.
15. Критична точка.
16. Аналогія між критичною точкою та чорною дірою.
17. Надплинність.
18. Надпровідність.
19. Плазмовий фазовий перехід.



## **VI. ФОРМИ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮ**

### **МЕТА І ФОРМИ ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ**

Мета поточного контролю – оцінити ступінь засвоєння теоретичного і практичного матеріалу та рівень знань студентів з відповідних розділів дисципліни.

*Рівень поточних знань оцінюється в балах по кожному із передбачених видів практичних завдань окремо:*

- володіння теоретичним матеріалом;
- розуміння сутності фізичних явищ;
- вміння робити оцінки за порядком величин;
- розв’язання задач аналітичного характеру;
- розв’язання задач обчислювального характеру.

Згідно до методики рейтингової оцінки поточний рейтинг аспіранта розраховується як сума балів за всіма видами практичних завдань, колоквиуму та контрольної роботи (плюс показники відвідування лекційних та практичних занять) і нараховується протягом семестру.

Аспіранти, поточні знання яких оцінені на “незадовільно” (0-29 балів), вважаються не атестованими і до іспиту з дисципліни не допускаються. Аспіранти, які за роботу в семестрі та на іспиті набрали 30-59 балів мають право на перескладання.

### **МЕТА І ФОРМИ ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ**

Підсумковий контроль знань здійснюється наприкінці семестру шляхом складання іспиту.

До іспиту допускаються аспіранти, які мають необхідний рівень поточних знань.

Іспит проводиться в змішаній формі, по завданнях які складені на основі програми курсу та мають однаковий рівень складності. На підготовку відводиться 2 академічні години. Під час проведення іспиту дозволяється користуватися конспектом.

## **ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ**

1. Класифікація різновидів плазми.
2. Критерії неідеальності плазми. .
3. Електронейтральність плазми.
4. Рівняння Гамільтона.
5. Структура теорії Гіббса.

6. Кореляційна сфера і термостат.
7. Рівняння Ліувілля.
8. Термодинамічна границя.
9. Ланцюжок ББГКІ.
10. Закони збереження для замкненої ізольованої системи.
11. Канонічне розподілення Гіббса.
12. Статистична сума та конфігураційний інтеграл.
13. Фундаментальна система двох рівнянь для функцій розподілення.
14. Рівняння Орнштейна-Церніке для плазми.
15. Рівняння стану для дебаївської плазми.
16. Термодинамічні функції дебаївської плазми.
17. Мікрополе в плазмі.
18. Механізми розширення спектральних ліній в плазмі.
19. Метод вторинного квантування.
20. Запізніла та випереджувальна функції Гріна.
21. Теорема Віка.
22. Температурні функції Гріна.
23. Теорія збурень для неідеальних систем.
24. Оператор впорядкування.
25. Обмінні ефекти.
26. Термодинамічний потенціал для квантових неідеальних систем.
27. Причинна функція Гріна.
28. Статистична сума для квантових неідеальних систем.
29. Рівняння Сага з квантовими поправками.
30. Ефективний потенціал. Кільцеві діаграми.
31. Термодинамічний потенціал. Внески від кільцевих та обмінних діаграм.
32. Термодинамічний потенціал. Драбинкове наближення.
33. Термодинамічний потенціал. Внески від неперервного та дискретного спектрів.
34. Термодинамічний потенціал для водневої плазми.
35. Статистична сума з квантовим поправками для водневої плазми.
36. Віріальне рівняння стану для неідеальної плазми.
37. Зниження потенціалу іонізації в плазмі.
38. Кінетичне рівняння для плазми.
39. Інтегралі зіткнень.
40. Транспортні коефіцієнти.
41. Метод функцій Гріна для розрахунку транспортних коефіцієнтів.
42. Фазові переходи в плазмі.
43. Критичні явища в плазмі.
44. Рівняння стану для ідеального та неідеального бозе-газу.

## VII. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ І ВМІНЬ СТУДЕНТІВ, УМОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО РЕЙТИНГУ

Рівень поточних знань студентів оцінюється відповідно до методики рейтингової оцінки. Сутність методики полягає у визначенні поточного рейтингу студента, що розраховується як сума балів за всіма видами практичних завдань та результатами самостійної роботи і наращується протягом семестру.

<i>Вид роботи</i>	<i>Обсяг за семестр</i>	<i>Максимальна кількість балів за виконану роботу</i>
<i>Теоретичне питання (просте)</i>	<i>4</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 1 бал. Всього за семестр – 4 бали.</i>
<i>Теоретичне питання (ускладнене)</i>	<i>4</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 2 бали. Всього за семестр – 8 балів</i>
<i>Розв'язування задач</i>	<i>2</i>	<i>Кожне правильне розв'язання – 5 балів. Всього за семестр – 10 балів</i>
<i>Проведення колоквиуму та контрольної роботи</i>	<i>1</i>	<i>Кожне правильне розв'язання завдання – 5 балів. Всього за колоквиум та контрольну роботу – 10 балів</i>
<i>Відвідування лекцій</i>	<i>16</i>	<i>Кожна відвідана лекція – 1 бал. Всього за семестр – 16 балів</i>
<i>Відвідування семінарів</i>	<i>14</i>	<i>Кожний відвіданий семінар – 1 бал. Всього за семестр – 14 балів</i>
<i>Сукупний рейтинг</i>	<i>-</i>	<i>60 балів</i>

### КРИТЕРІЇ СКЛАДАННЯ ІСПИТУ (ЗАЛІКУ)

Кожне завдання для проведення іспиту (заліку) має бути однакової складності. Зміст питань та завдань має бути розрахований на письмову підготовку аспіранта протягом двох академічних годин.

*Максимальна кількість балів на проведення підсумкового контролю – 40.* Критерії оцінки підсумкових знань при складанні іспиту наведені в таблиці .

#### *Критерії складання іспиту (заліку)*

<i>Характеристика відповіді по варіанту</i>	<i>Максимальна кількість балів</i>
<i>Зміст 2-х теоретичних питань розкрито повністю і в розгорнутому вигляді</i>	<i>30</i>
<i>Вірні відповіді на тести /додаткові питання чи розв'язок задач</i>	<i>10</i>
<i>ВСЬОГО</i>	<i>40 балів</i>

За результатами складання іспиту (заліку) якість підсумкових знань аспіранта оцінюється за рейтинговою системою та трансформується в національну шкалу та шкалу ECTS

Таблиця

Порядок перерахунку рейтингових показників нормованої 100-бальної університетської шкали оцінювання в національну 4-бальну шкалу та шкалу ECTS.

За шкалою університету	За національною шкалою		За шкалою ECTS
	Іспит	Залік	
91 – 100	5 (відмінно)	Зараховано	A (відмінно)
81 – 90	4 (добре)		B (дуже добре)
71 – 80			C (добре)
66 – 70	3 (задовільно)		D (задовільно)
60 – 65			E (достатньо)
30 – 59	2 (незадовільно)	Не зараховано	FX (незадовільно – з можливістю повторного складання)
1 – 29			F (незадовільно – з обов'язковим повторним курсом)