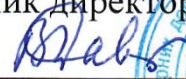


# НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

## ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора з наукової роботи

 В.В. Давидовський

« 09 » жовтня 2024 р.



### *НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ*

#### **Основи фізики 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 2024**

**Основи фізики плазми: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2024. - 10 с.**

**Укладач:** Ю.В. Яковенко, доктор фіз.-мат. наук, с. н. с., пров. наук. співр. відділу теорії ядерного синтезу

Ухвалено на засіданні Вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України

протокол № 10 від “ 8 ” жовтня 2024 р.

**Опис навчальної дисципліни**  
**«Основи фізики плазми»**

|                                                                                    |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність,<br>освітньо-кваліфікаційний рівень |                         |
| <i>Галузь знань</i>                                                                | 10 Природничі науки     |
| <i>Напрямок підготовки</i>                                                         | 104 Фізика і астрономія |
| <i>Освітньо-кваліфікаційний рівень</i>                                             | доктор філософії        |
| Характеристика навчальної дисципліни                                               |                         |
| <i>Вид</i>                                                                         | Вибір Інституту         |
| <i>Загальна кількість годин</i>                                                    | 120                     |
| <i>Кількість кредитів ECTS</i>                                                     | 4                       |
| <i>Кількість змістових модулів</i>                                                 | 2                       |
| <i>Форма контролю</i>                                                              | іспит                   |
| Показники навчальної дисципліни для денної форми<br>навчання                       |                         |
| <i>Рік підготовки</i>                                                              | II                      |
| <i>Лекційні заняття</i>                                                            | 32                      |
| <i>Практичні, семінарські<br/>заняття</i>                                          | 16                      |
| <i>Лабораторні заняття</i>                                                         | немає                   |
| <i>Самостійна робота</i>                                                           | 70                      |
| <i>Консультації</i>                                                                | 2                       |

## Вступ

Дисципліна «**Основи фізики плазми**» є частиною професійної підготовки аспірантів за вибором Інституту за напрямом 10 Природничі науки, *спеціальністю* – 104 Фізика і астрономія, що викладається протягом другого року навчання.

**Метою** викладання навчальної дисципліни є ознайомлення з основним понятійним арсеналом фізики плазми і вивчення сучасних теоретичних методів та моделей, що застосовуються для опису фізичних процесів у плазмі. Основними завданнями вивчення дисципліни «**Основи фізики плазми**» є (1) оволодіння методами, що використовуються для опису руху окремих частинок у плазмі; (2) ознайомлення з основними типами колективних явищ — хвиль та нестійкостей — у плазмі; (3) опанування методів лінійного та нелінійного аналізу явищ у плазмі.

Після вивчення курсу аспірант повинен **знати**:

- визначення плазми;
- рівняння дрейфового руху заряджених частинок в електромагнітному полі;
- методи опису нелінійної взаємодії хвиль і заряджених частинок;
- критерії стохастичності руху частинок в електромагнітному полі;
- особливості зіткнень заряджених частинок у плазмі;
- процеси перенесення частинок та енергії;
- визначення та властивості тензора діелектричної проникності плазми;
- основні типи хвиль в ізотропній і магнітоактивній плазмі;
- типи нестійкостей нерівноважної плазми.

В результаті вивчення дисципліни аспірант повинен **вміти**:

- вибирати ту чи іншу теоретичну модель для опису фізичних процесів у плазмових системах;
- застосовувати основні теоретичні методи для розв'язування рівнянь моделі;
- аналізувати фізичний сенс отриманих розв'язків та давати фізичну інтерпретацію досліджуваних явищ;
- самостійно опановувати та використовувати літературу з фізики плазми.

Контроль знань аспіранта здійснюється за модульно-рейтинговою системою. Змістовий модуль 1 включає теми 1–4, змістовий модуль 2 – теми 5–9.

# **ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

## **Зміст навчальної дисципліни**

### **Модуль 1. Базові поняття фізики плазми та рух частинок у плазмі.**

#### **ТЕМА 1. Визначення та основні властивості плазми. (2 год.)**

Вступ. Поняття про колективні процеси та квазинейтральність. Ленгмюрові коливання. Радіус Дебая та екранування зарядів. Слабко неідеальна (в термодинамічному сенсі) плазма. Огляд областей застосування фізики плазми та різновидів плазми.

#### **ТЕМА 2. Магнітогідродинамічна (МГД) модель плазми. (2 год.)**

Рівняння магнітної гідродинаміки. Вмерзлість та дифузія магнітного поля. Рівновага та рівняння балансу сил. Магнітні поверхні. Пружність магнітних силових ліній. Діамагнетизм плазми.

#### **ТЕМА 3. Рух частинок в електромагнітному полі. (6 год.)**

Рух заряджених частинок в однорідних електричних та магнітних полях. Ларморове коло. Збереження магнітного моменту в слабко неоднорідному полі. Слабко неоднорідні поля та дрейфове наближення. Утримання частинок між магнітними дзеркалами. Нелінійна теорія резонансу в гамільтонових системах. Резонансні острови та динаміка частинок, захоплених у резонансі. Стохастичність. Критерій Чірікова

#### **ТЕМА 4. Зіткнення та перенесення в плазмі. (6 год.)**

Транспортний переріз розсіювання та кулонівський логарифм. Характерні часи передачі імпульсу та енергії від струменя до фонові плазми. Часи релаксації. Спітцєрова провідність. Електрони-втікачі. Рівновага в двоплинній моделі і дрейфові потоки. Класична дифузія поперек магнітного поля. Амбіполяриність.

### **Модуль 2. Хвилі та нестійкості в плазмі.**

#### **ТЕМА 5. МГД хвилі та нестійкості. (4 год.)**

Дисперсія альфвенових та магнітозвукових хвиль. Енергетичний принцип. Джерела енергії гвинтової та конвективної нестійкостей. Конвективна нестійкість плазмового циліндра зі струмом.

#### **ТЕМА 6. Хвилі в двоплинній МГД. (2 год.)**

Дисперсія ленгмюрових та йонно-звукових коливань у плазмі без магнітного поля. Поперечні хвилі в холодній плазмі та частота відсічки. Верхньогібридні та нижньогібридні коливання.

**ТЕМА 8. Хвилі в неоднорідній плазмі. (4 год.)**

Наближення геометричної оптики (метод ВКБ). Комплексна провідність та комплексна діелектрична проникність. Часова та просторова дисперсія. Дисперсійне рівняння та його використання для аналізу коливань. Тензор діелектричної проникності в МГД наближенні.

**ТЕМА 7. Кінетичний підхід до вивчення хвиль у плазмі. (4 год.)**

Рівняння Власова. Задача Ландау. Кінетична теорія ленгмюрових коливань та згасання Ландау. Поняття про плазмово-струменева нестійкість.

**ТЕМА 9. Розпади хвиль. (2 год.)**

Розпади хвиль. Приклади розпадних хвиль. Динаміка системи з трьох хвиль та розпадна нестійкість. Поняття про слабку турбулентність.

**Структура навчальної дисципліни**

| Назва лекції                                                                              |           |                        |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------|----------------------|
|                                                                                           | лекції    | Практичні/<br>семінари | Самостійна<br>робота |
| <b><i>Змістовний модуль 1. Базові поняття фізики плазми та рух частинок у плазмі.</i></b> |           |                        |                      |
| <b>Тема 1.</b> Визначення та основні властивості плазми.                                  | 2         | 1                      | 6                    |
| <b>Тема 2.</b> МГД модель плазми.                                                         | 2         | 1                      | 6                    |
| <b>Тема 3.</b> Рух частинок в електромагнітному полі.                                     | 6         | 4                      | 14                   |
| <b>Тема 4.</b> Зіткнення та перенесення в плазмі.                                         | 6         | 4                      | 14                   |
| <b><i>Разом за змістовний модуль 1</i></b>                                                | <b>16</b> | <b>10</b>              | <b>40</b>            |
| <b><i>Змістовний модуль 2. Хвилі та нестійкості в плазмі.</i></b>                         |           |                        |                      |
| <b>Тема 5.</b> МГД хвилі та нестійкості.                                                  | 4         | 4                      | 8                    |
| <b>Тема 6.</b> Хвилі в двофазній МГД.                                                     | 2         | 2                      | 4                    |
| <b>Тема 7.</b> Хвилі в неоднорідній плазмі.                                               | 4         | 0                      | 6                    |
| <b>Тема 8.</b> Кінетичний підхід до вивчення хвиль у плазмі.                              | 4         | 0                      | 8                    |

|                                            |           |           |           |
|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Тема 9. Розпади хвиль.</b>              | <b>2</b>  | <b>0</b>  | <b>4</b>  |
| <b><i>Разом за змістовний модуль 2</i></b> | <b>16</b> | <b>6</b>  | <b>30</b> |
| <b><i>Всього</i></b>                       | <b>32</b> | <b>16</b> | <b>70</b> |

Загальний обсяг: 120 год., зокрема: лекцій – 32 год.; практичних/семінарів – 16 год., самостійної роботи – 70 год., консультацій – 2 год.

### **Тематичний план практичних та семінарських занять (16 год)**

| <b>№</b> | <b>Назва теми</b>                                      | <b>К-ть годин</b> |
|----------|--------------------------------------------------------|-------------------|
| 1.       | Розв'язання задач про рівновагу плазми та рух частинок | 6                 |
| 2.       | Розв'язання задач про зіткнення та перенесення         | 4                 |
| 3.       | Розв'язання задач про МГД хвилі                        | 4                 |
| 4.       | Розв'язання задач про хвилі в двоплинній МГД           | 2                 |

### **Самостійна робота**

| <b>№</b> | <b>Назва</b>                    | <b>К-ть годин</b> |
|----------|---------------------------------|-------------------|
| 1.       | Самостійна робота над задачами  | 30                |
| 2.       | Підготовка до навчальних занять | 40                |

### **Запитання для самоперевірки**

1. Яке йонізоване середовище зветься квазинейтральним?
2. Яку речовину можна назвати плазмою, яку – ні? Наведіть приклади.
3. Що таке плазмова частота?
4. Що таке дебаїв радіус?
5. Що таке гаряча (холодна) плазма?
6. Яка плазма є ближчою до ідеальної, щільна чи розріджена? Чому?
7. З яких рівнянь складаються рівняння магнітної гідродинаміки?
8. Що таке вмерзлість магнітного потоку і за яких умов вона має місце?

9. Що таке скін-шар?
10. Коли має сенс наближення ідеально провідної плазми?
11. Які фізичні процеси втрачаються в моделі одноплинної гідродинаміки?
12. Які процеси визначають встановлення стаціонарного електромагнітного поля в плазмі і які характерні часи цих процесів?
13. Чому можна говорити про пружність магнітних силових ліній?
14. Що таке ларморів радіус та циклотронна частота?
15. Коли є застосовним дрейфове наближення?
16. Що таке ефект магнітного дзеркала?
17. Яка сила гальмує заряджену частинку при відбитті від магнітного дзеркала?
18. Чому заряджена частинка в магнітному при дії зовнішньої сили дрейфує поперек цієї сили?
19. Які дрейфи вам відомі?
20. Що таке резонансний острів?
21. Що обмежує ширину резонансу частинки з хвилею при нелінійному розгляді? Як вона залежить від амплітуди хвилі?
22. Що таке критерій Чирикова?
23. Якою може бути структура магнітної силової лінії?
24. У чому полягає головна відмінність між зіткненнями в газі і в плазмі?
25. Які зіткнення є важливішими, далекі чи близькі? Чому?
26. Що таке кулонівський логарифм?
27. Чим відрізняються передача енергії та імпульсу при зіткненнях?
28. Чому часи електрон-йонних та йон-електронних зіткнень є різними?
29. Який процес є швидшим при зіткненнях йонного струменя з електронами, гальмування чи розсіювання? Чому? А при зіткненнях електронного струменя з йонами?
30. Якою є ієрархія часів: термалізація («максвелізація») електронів, термалізація йонів, встановлення рівноваги між електронами та йонами?
31. Чому класична провідність у плазмі не залежить від концентрації носіїв заряду?
32. Що таке електрони-втікачі?
33. Як пояснити класичну дифузію на гідродинамічній та кінетичній «мовах»?
34. Що таке діамагнітний струм і як пояснити його на цих мовах?
35. Чому і за яких умов можна користатись рівнянням рівноваги стаціонарної плазми?
36. Якими є фазові та групові швидкості різних типів МГД-хвиль (альфвенових та магнітозвукових)?
37. Яким є якісний характер коливань плазми кожної з гілок МГД-хвиль?
38. Яким є напрямок поширення енергії МГД-хвилями?
39. Якими є енергетичні джерела гвинтової та конвективної нестійкостей?
40. Чому одноплинна та двоплинна МГД-моделі дали різні значення для швидкості йонного звуку?
41. Чи є парадоксом те, що фазова швидкість ленгмюрових хвиль при великій довжині хвилі перевищує швидкість світла?

42. Що таке плазмове наближення? Для яких хвиль воно є застосовним?
43. Що таке частота відсічки, від чого вона залежить і чому є важливою?
44. У чому полягають відносні переваги кінетичного та гідродинамічного підходів?
45. Які властивості середовища треба знати, щоб визначити тензор діелектричної проникності?
46. Що таке рівняння Власова?
47. Що нового додає кінетичний розгляд порівняно з магнітогідродинамічним для ленгмюрових хвиль?
48. Як можна на якісному рівні пояснити, що таке згасання Ландау і плазмово-струменева нестійкість?
49. Коли можна застосовувати наближення геометричної оптики?
50. Що таке промінь хвилі?
51. Що таке дифракція і коли вона є важливою?
52. Коли розпад хвилі є можливим?
53. Що таке розпадна нестійкість?
54. Що таке слабка турбулентність?

### Запитання до заліку

1. Визначення плазми. Квазінейтральність. Плазмове частота. Ідеальна плазма. Дебаїв радіус.
2. Магнітна гідродинаміка. Вмерзлість та дифузія магнітного поля.
3. Рівновага плазми. Діамагнетизм плазми.
4. Рух заряджених частинок в електромагнітному полі. Дрейфове наближення.
5. Нелінійний резонанс у гамільтонових системах.
6. Кулонівські зіткнення в плазмі та транспортний переріз розсіювання.
7. Зіткнення частинок довільної маси та енергообмін при зіткненнях.
8. Електропровідність плазми. Електрони-втікачі.
9. Класична дифузія поперек магнітного поля.
10. Магнітогідродинамічні хвилі.
11. Гідродинамічна теорія ленгмюрових хвиль та йонного звуку.
12. Поперечні електромагнітні хвилі та частота відсічки.
13. Наближення геометричної оптики (метод ВКБ).
14. Комплексна провідність та комплексна діелектрична проникність. Часова та просторова дисперсія. Дисперсійне рівняння та його використання для аналізу коливань.
15. Задача Ландау та кінетична теорія ленгмюрових хвиль.
16. Згасання Ландау та плазмово-струменева нестійкість.
17. Розпади хвиль та розпадна нестійкість.
18. Слабка турбулентність.

## Форма контролю знань аспіранта

Основною формою поточного контролю знань є проведення модульних контрольних робіт та здача завдань для самостійної роботи. За результатами 2-х модульних контрольних робіт та 2-х завдань виводиться основна оцінка, яка переводиться у рейтингові бали (0-15 балів за модульну контрольну роботу та за завдання). До них додаються бали за результатами складання заліку (0-40 балів).

### Шкала оцінювання: національна та ECTS

| Сума балів за всі види навчальної діяльності | Оцінка ECTS           | Оцінка за національною шкалою для заліку                    |
|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|
| 90–100<br>82–89<br>74–81<br>64–73<br>60–63   | A<br>B<br>C<br>D<br>E | зараховано                                                  |
| 35–59                                        | FX                    | не зараховано з можливістю повторного складання             |
| 0–34                                         | F                     | не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни |

## Література

1. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976.
2. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
3. Трубников Б.А. Столкновения частиц в полностью ионизованной плазме. В сб.: Вопросы теории плазмы, вып. 1, с. 98. М.: Госатомиздат, 1963.
4. Шафранов В.Д. Электромагнитные волны в плазме. В сб.: Вопросы теории плазмы, вып. 3, с. 3. М.: Госатомиздат, 1963.
5. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
6. Чен Ф. Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987.
7. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980.
8. Ситенко А.Г., Мальнев В.М. Основы теории плазмы. К.: Наукова думка, 1994.
9. Huba J.D. Revised NRL Plasma Formulary. Washington: Naval Research Laboratory, 1998.
10. Котельников И.А., Ступаков Г.В. Лекции по физике плазмы. Новосибирск: НГУ, 1996.
11. Bellan P.M. Fundamentals of Plasma Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
12. White R.B. The Theory of Toroidally Confined Plasmas. London: Imperial College Press, 2006 (або ж White R.B. Theory of Tokamak Plasmas. Amsterdam: North-Holland, 1989).