

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник директора з наукової роботи

В. В. Давидовський
« 5 » 2023 р.



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ

Керований термоядерний синтез

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

Керований термоядерний синтез: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2023. - 11 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 № 6 від “ 5 ” липня 2023 р.

**Опис навчальної дисципліни
«Керований термоядерний синтез»**

Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, 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 навчання	
<i>Рік підготовки</i>	II
<i>Лекційні заняття</i>	32
<i>Практичні, семінарські заняття</i>	16
<i>Лабораторні заняття</i>	немає
<i>Самостійна робота</i>	70
<i>Консультації</i>	2

Вступ

Дисципліна «Керований термоядерний синтез» 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 надання інформації про керований термоядерний синтез як перспективне альтернативне джерело енергії, його переваги та недоліки порівняно з іншими джерелами енергії, можливі шляхи його здійснення та поглиблене знайомство з теорією та сучасним станом досліджень з магнітного утримання. Основними завданнями дисципліни “Керований термоядерний синтез” є (1) отримати знання про перспективні реакції ядерного синтезу та критерії займання термоядерної реакції, (2) опанувати знання про найважливіші колективні процеси в плазмі токамаків та методи їх теоретичного аналізу, (3) вивчити теоретичні засади утримання плазми в токамаках та стелараторах, (4) сформулювати уявлення про сучасний стан світової програми термоядерних досліджень, її технічні та наукові проблеми і економічні, екологічні та безпекові показники термоядерної енергетики.

Після вивчення курсу аспірант повинен **знати**:

- Перспективні для енергетики реакції ядерного синтезу;
- Критерії займання термоядерної реакції;
- Фізику процесів перенесення в токамаках та стелараторах;
- Найважливіші колективні процеси в токамаках та стелараторах;
- Головні технічні проблеми токамаків та стелараторів;
- Економічні, екологічні та безпекові властивості термоядерної енергетики;
- Сучасний стан, напрямки та європейську дорожню карту термоядерних досліджень.

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

- Розрахувати рівновагу та орбіти частинок у токамаку;
- Розрахувати енергобаланс токамака-реактора;
- Розраховувати властивості струменів швидких йонів у плазмі;
- Знаходити характерні частоти важливих коливань плазми токамака;
- Самостійно опанувати та використовувати літературу.

Контроль знань аспіранта здійснюється за модульно-рейтинговою системою. Змістовий модуль 1 включає теми 1–3, змістовий модуль 2 – теми 4–8, змістовий модуль 3 – теми 9–11.

ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Зміст навчальної дисципліни

Модуль 1. Засади термоядерного синтезу та магнітного утримання плазми.

ТЕМА 1. Основні поняття ядерного синтезу. (2 год.)

Перспективні ядерні реакції синтезу. Основні підходи до утримання палива. Критерії займання термоядерної реакції для магнітного та інерційного утримання.

ТЕМА 2. Рівновага тороїдної плазми. (2 год.)

Рівняння Греда-Шафранова. Шафрановський зсув. Магнітні координати. Рівновага асиметричної тороїдної конфігурації.

ТЕМА 3. Утримання частинок у тороїдній плазмі. (6 год.)

Орбіти заряджених частинок у симетричній тороїдній магнітній конфігурації. Неокласичне перенесення. Бутстреп-струм. Орбіти заряджених частинок у стелараторі: супербананові та перехідні орбіти. Неамбіполяристість неокласичної дифузії та пов'язане з нею електричне поле. Електронний та йонний режими перенесення.

Модуль 2. Колективні процеси в плазмі токамаків.

ТЕМА 4. Магнітогідродинамічні (МГД) нестійкості. (2 год.)

Енергетичний принцип в аналізі МГД-стійкості. Конвективна нестійкість та її критерії. Балонний різновид МГД-нестійкості. Гвинтова нестійкість, зовнішня та внутрішня.

ТЕМА 5. Тіринг-мода та магнітні острови. (2 год.)

Фізика тіринг-моди. Нелінійна динаміка магнітного острова. Неокласичні тіринг-моди.

ТЕМА 6. Аномальне перенесення. (4 год.)

Стохастизація магнітного поля. Дрейфові коливання та нестійкості. Перенесення через магнітну турбулентність. Перенесення через електростатичну турбулентність. Емпіричні скейлінги перенесення. Транспортні бар'єри.

ТЕМА 7. Нелінійні МГД-події. (2 год.)

Магнітне перезамкнення. Пилчасті коливання. Нестійкість зриву.

ТЕМА 8. Фізика надтеплових йонів. (4 год.)

Джерела швидких йонів у термоядерній плазмі. Функція розподілу швидких йонів. Стохастична дифузія. Механізми втрат швидких йонів. Альфвенів хвилі в неоднорідній плазмі. Альфвенів континуум та альфвенів власні моди. Альфвенівські нестійкості. Фішбон-мода.

Модуль 3. Проблеми та перспективи термоядерних досліджень.

ТЕМА 9. Альтернативні концепції керованого ядерного синтезу. (2 год.)

Відкриті пастки та інші альтернативні схеми магнітного утримання. Інерційний синтез. Плазмовий фокус. Холодний синтез.

ТЕМА 10. Технологічні та соціальні аспекти КТС. (4 год.)

Енергетичний баланс реактора-токамака. Параметр β . Методи нагрівання плазми та підтримання струму. Перспективні режими роботи реактора. Бланкет та перетворення енергії. Проблема першої стінки. Дивертор. Економічні, екологічні та безпекові аспекти термоядерної енергетики. Порівняння з іншими різновидами ядерної та неядерної енергетики.

ТЕМА 11. Сучасний стан та перспективи термоядерних досліджень. (2 год.)

Досягнуті параметри пристроїв для магнітного та інерційного утримання плазми. Токамак ITER. Європейська дорожня карта зі здійснення КТС.

Структура навчальної дисципліни

Назва лекції			
	лекції	Практичні/ семінари	Самостійна робота
<i>Змістовний модуль 1. Засади термоядерного синтезу та магнітного утримання плазми.</i>			
Тема 1. Основні поняття ядерного синтезу.	2	0	4
Тема 2. Рівновага тороїдної плазми.	2	2	6
Тема 3. Утримання частинок у тороїдній плазмі.	6	4	14
<i>Разом за змістовний модуль 1</i>	10	6	24
<i>Змістовний модуль 2. Колективні процеси в плазмі токамаків.</i>			
Тема 4. МГД-нестійкості.	2	2	6
Тема 5. Тіринг-мода та магнітні острови.	2	0	4

Тема 6. Аномальне перенесення.	4	2	8
Тема 7. Нелінійні МГД-події.	2	2	4
Тема 8. Фізика надтеплових йонів.	4	2	8
Разом за змістовний модуль 2	14	8	30
<i>Змістовний модуль 3. Проблеми та перспективи термоядерних досліджень.</i>			
Тема 9. Альтернативні концепції керованого ядерного синтезу.	2	0	4
Тема 10. Технологічні та соціальні аспекти КТС.	4	2	8
Тема 11. Сучасний стан та перспективи термоядерних досліджень.	2	0	4
Разом за змістовний модуль 3	8	2	16
Всього	32	16	70

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)

№	Назва теми	К-ть годин
1.	Розв'язання задач про рівновагу плазми	2
2.	Розв'язання задач про утримання частинок	4
3.	Розв'язання задач про динаміку магнітних островів	2
4.	Розв'язання задач про аномальне перенесення	2
5.	Розв'язання задач про нелінійні МГД-події	2
6.	Розв'язання задач з фізики надтеплових йонів	2
7.	Розв'язання задач про енергобаланс реактора	2

Самостійна робота

№	Назва	К-ть годин
1.	Самостійна робота над задачами	30
2.	Підготовка до навчальних занять	40

Запитання для самоперевірки

1. Які реакції ядерного синтезу є перспективними для енергетики?
2. Чому паливо нагрівають до стану гарячої плазми?
3. Які умови необхідні для займання термоядерної реакції при магнітному та інерційному утриманні?
4. Що описує рівняння Греда-Шафранова?
5. Що таке магнітні координати? Які магнітні координати вам відомі?
6. Чому зручні координати Бузера?
7. Які типи орбіт заряджених частинок у токамаку ви знаєте?
8. Від чого залежить ширина дрейфової орбіти частинки в токамаку?
9. Як можна класифікувати орбіти частинок у стелараторі?
10. Якою є ширина супербананової орбіти? Чому існування цих орбіт є важливим?
11. Які режими неокласичного перенесення в токамаку ви знаєте? Якою є залежність коефіцієнту неокласичної дифузії частинок від частоти зіткнень?
12. Як залежить від частоти зіткнень коефіцієнт неокласичної дифузії в стелараторі?
13. Що таке перспективні стеларатори і які напрямки їх розробки ви знаєте?
14. Якими є джерела енергії і, відповідно, типи МГД-нестійкостей?
15. Чому важливі конвективні нестійкості?
16. Що таке середня магнітна яма?
17. У чому відмінність зовнішніх та внутрішніх гвинтових нестійкостей?
18. Що таке тіринг-моди?
19. Якої є нелінійна динаміка магнітного острова?
20. Що таке неокласичні тіринг-моди?
21. За яких умов відбувається стохастизація магнітного поля?
22. Якою може бути топологія магнітної силової лінії в стаціонарній магнітній конфігурації?
23. Якими є коефіцієнти дифузії, викликані магнітною та електростатичною турбулентністю?
24. Що таке внутрішні транспортні бар'єри?
25. Що таке «жорсткість профілів» параметрів плазми і з чим вона пов'язана?

26. Що таке пилчасті коливання?
27. Що таке нестійкість зриву і чим вона небезпечна?
28. Які механізми нестійкості зриву вам відомі?
29. Що робиться для запобігання наслідкам зриву?
30. Що таке альфвенівський континуум? Яким рівнянням він описується?
31. Що відбувається при збудженні коливань із частотою в альфвенівському континуумі?
32. Які типи альфвенівських власних мод ви знаєте? Якими є їх частоти?
33. Яким чином і через які резонанси відбувається збудження альфвенівських нестійкостей?
34. Що таке нестійкість фішбон-моди і чим вона збуджується?
35. Якою є функція розподілу швидких йонів за енергіями?
36. Як залежать механізми зіткнень, яких зазнає швидкий йон, від його енергії?
37. Що таке скейлінги часу утримання, навіщо їх створюють і який характер вони мають?
38. Які режими розряду в токамаках розглядаються як перспективні для реактора?
39. Які методи використовуються для нагрівання плазми та підтримання струму в сучасних токамаках?
40. У чому полягають взаємні переваги та недоліки токамаків та стелараторів?
41. Що таке перша стінка та які з нею пов'язані проблеми?
42. Що таке дивертор, навіщо він створюється і які технологічні проблеми з ним виникають?
43. Як запобігають нагромадженню важких домішок в плазмі? Навіщо?
44. Який бланкет планується в токамаку-реакторі?
45. Що таке параметр β і чому він є важливим? Як це впливає на вибір конфігурації реактора?
46. Яким чином планується відбирати енергію з токамака-реактора?
47. Звідки буде отримуватись паливо для термоядерного реактора?
48. Від чого залежить економічна ефективність термоядерного реактора?
49. Якими є переваги та недоліки термоядерної енергетики з погляду екології?
50. Чи витримує термоядерна енергетика порівняння з іншими джерелами енергії з погляду безпеки?
51. Які альтернативні схеми КТС ви знаєте?
52. Які варіанти здійснення інерційного КТС вам відомі?
53. Яким є стан робіт з інерційного КТС?
54. Що таке холодний синтез? Яким є стан робіт з холодного синтезу?
55. Яким є стан робіт з магнітного термоядерного синтезу і які рекордні параметри було досягнуто?
56. Що планується здійснити в токамаку ITER?
57. Якою є європейська дорожня карта зі здійснення КТС?
58. Що таке DEMO та IFMIF?

Запитання до заліку

1. Перспективні для енергетики реакції ядерного синтезу. Підходи до утримання термоядерного палива. Критерії займання термоядерної реакції.
2. Рівновага тороїдної плазми.
3. Магнітні координати.
4. Орбіти заряджених частинок у токамаку.
5. Орбіти заряджених частинок у стелараторі.
6. Неокласичне перенесення в токамаку.
7. Неокласичне перенесення в стелараторі.
8. Перспективні стеларатори.
9. Енергетичний принцип та МГД-нестійкості.
10. Тіринг-моди та магнітні острови. Неокласичні тіринг-моди.
11. Дрейфова турбулентність та внутрішні транспортні бар'єри. Жорсткість профілів параметрів плазми.
12. Пилчасті коливання.
13. Нестійкість зриву та запобігання її наслідкам.
14. Альфвенівський континуум та його властивості в токамаках та стелараторах. Поглинання енергії континуумом.
15. Альфвенівські власні моди та їх збудження швидкими йонами.
16. Фішбон-нестійкість.
17. Швидкі йони в термоядерній плазмі: кулонівські зіткнення та функція розподілу.
18. Стохастична дифузія швидких йонів та інші механізми втрат.
19. Альтернативні схеми КТС. Холодний синтез.
20. Інерційний КТС: підходи до здійснення та сучасний статус.
21. Енергетичний баланс реактора-токамака. Параметр β .
22. Перспективні режими розряду в токамаку-реакторі.
23. Методи нагрівання плазми та підтримання струму в сучасних токамаках.
24. Перша стінка. Дивертор. Бланкет та перетворення енергії.
25. Економічні, екологічні та безпекові аспекти термоядерної енергетики. Порівняння з іншими різновидами ядерної та неядерної енергетики.
26. Токамак ITER. Європейська дорожня карта зі здійснення КТС.

Форма контролю знань аспіранта

Основною формою поточного контролю знань є проведення модульних контрольних робіт. За результатами 3-х модульних контрольних робіт виводиться основна оцінка, яка переводиться у рейтингові бали (0-20 балів за модульну контрольну роботу). 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 82–89 74–81 64–73 60–63	A B C D 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. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
3. Mirnov S.V. From pure fusion to fusion–fission Demo tokamaks. // Nucl. Fusion. – 2013. – Vol. 52. – 045003.
4. Glaser A., Goldston R.J. Proliferation risks of magnetic fusion energy: clandestine production, covert production and breakout. // Nucl. Fusion. – 2012. – Vol. 52. – P. 1-9.
5. Fusion Physics, ed. by M. Kikuchi, K. Lackner, M.Q. Tran // Vienna: IAEA, 2012. – 1158 p.
(http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1562_web.pdf)
6. Роуз Д., Кларк М. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. – М.: Госатомиздат, 1963.
7. Storms E. Review of the “cold fusion” effect. // J. Scientific Exploration. – 1996. – Vol. 10. – P. 185-243.
8. Чен Ф. Введение в физику плазмы. // М.: Мир, 1987.
9. Ситенко А.Г., Мальнев В.М. Основы теории плазмы. // К.: Наукова думка, 1994.
10. Bellan P.M. Fundamentals of Plasma Physics // Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
11. Котельников И.А., Ступаков Г.В. Лекции по физике плазмы. // Новосибирск: НГУ, 1996.
12. White R.B. The Theory of Toroidally Confined Plasmas. // London: Imperial College Press, 2006.
13. Horton W. Turbulent Transport in Magnetized Plasmas // Singapore: World Scientific Books, 2012, Chapter 1.
14. AbuTaha A.F. Cold fusion – the heat mechanism // J. Fusion Energy. – 1996. – Vol. 9. – P. 345.
15. Kühne R.W. Possible explanations for failures to detect cold fusion // Phys. Lett. A. – 1991. – Vol. 159. – P. 108-212.