

СИЛАБУС
навчальної дисципліни
«КЕРОВАНИЙ ТЕРМОЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ»

Галузь знань	10 - <i>Природничі науки</i>
Спеціальність	104 – <i>Фізика та астрономія</i>
Освітня програма	<i>Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу</i>
Освітній рівень	доктор філософії
Статус дисципліни	<i>Фаховий / Вибірковий</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Курс / семестр	<i>II (III) курс, 1 (2) семестр</i>
Кількість кредитів ЄКТС	<i>4 кредити</i>
Розподіл за видами занять та годинами навчання	<i>Лекції – 32 год. Практичні (семінарські) – 16 год. Лабораторні – 0. год. Самостійна робота – 70 год.</i>
Форма підсумкового контролю	<i>Іспит</i>
Відділ	<i>Відділ теорії ядерного синтезу, ІЯД НАН України, корп. 101, тел. +380-44-525-4283, http://www.kinr.kiev.ua/departments/fusion_theory/fusion_theory_ua.html</i>
Викладач (-і)	<i>Яковенко Юрій Володимирович, провідний науковий співробітник, д. ф.-м. н., с.н.с.</i>
Контактна інформація викладача (-ів)	<i>yakovenko@kinr.kiev.ua, +380-67-506-2096</i>
Дні занять	<i>П'ятниця</i>
Консультації	<i>Дистанційні, за домовленістю з ініціативи здобувача, групові</i>

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Мета навчальної дисципліни - формування у аспірантів компетентностей у галузі керованого термоядерного синтезу, 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.

Предмет навчальної дисципліни – керований термоядерний синтез (наукові основи, підходи до здійснення, поточні досягнення).

Компетентності

Інтегральна компетентність (ІК): Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми науково-дослідницької та/або розробницької, та/або інноваційної діяльності у сфері фізики та/або астрономії, застосовувати методологію науково-дослідницької та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

Загальні компетентності (ЗК):

ЗК.01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК.02. Здатність працювати в міжнародному контексті.

ЗК.03. 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):

СК.01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК.02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК.03. 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 і ефективно використовувати нову інформацію з різних джерел.

СК.06. 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. Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.

РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

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.

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.

Після засвоєння матеріалу дисципліни аспіранти 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; **уміти** робити оціночні розрахунки параметрів рівноважної конфігурації та орбіт частинок у токамаку; робити оціночні розрахунки енергобалансу токамака-реактора; розраховувати властивості струменів швидких йонів у плазмі; знаходити характерні частоти важливих коливань плазми токамака; **самостійно працювати** з навчальною, науковою та довідковою літературою з фізики плазми українською та іноземними мовами.

Передумови для навчання

Перелік попередньо прослуханих дисциплін / Знання, вміння, навички, якими повинен володіти здобувач, щоб приступити до вивчення дисципліни

Для успішного засвоєння дисципліни аспірант повинен знати загальну фізику, теорію електромагнітного поля, механіку та електродинаміку суцільного середовища, статистичну фізику, фізичну кінетику в обсязі стандартних університетських курсів, а також засвоїти курс «Основи фізики плазми».

Зміст навчальної дисципліни

Дисципліну структурно розділено на 2 розділи (модулі):

Розділ 1. Засади термоядерного синтезу та магнітного утримання плазми.

Розділ 2. Колективні процеси в плазмі токамаків.

Розділ 3. Проблеми та перспективи термоядерних досліджень.

Матеріально-технічне (програмне) забезпечення дисципліни

Для роботи (зокрема, розрахунків при виконанні практичних завдань) за темою курсу потрібен персональний комп'ютер; можна вважати, що ця вимога легко задовольняється для аспірантів ІЯД НАН України у тих відділах, де виконується наукова робота (навіть якщо аспірант не має ані особистого комп'ютера вдома, ані лептопа). Отже, кожний відділ у змозі створити аспірантові достатні умови для виконання завдань курсу.

Сторінка курсу на платформі Інституту (персональна навчальна система)

Наразі такої немає.

Рекомендовані джерела

Базова література:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. — М.: Наука, 1979.
3. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. — М.: Наука, 1976.
4. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. — М.: Атомиздат, 1968.
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. The EUROfusion Roadmap. — <https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>
8. Mirnov S.V. From pure fusion to fusion–fission Demo tokamaks. // Nucl. Fusion. — 2013. — Vol. 52. — 045003.
9. 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.
10. Storms E. Review of the “cold fusion” effect. // J. Scientific Exploration. — 1996. — Vol. 10. — P. 185-243.
11. Kühne R.W. Possible explanations for failures to detect cold fusion // Phys. Lett. A. — 1991. — Vol. 159. — P. 108-212.
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).

13. Chen F.F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion: 3rd ed. — Cham: Springer, 2018.
14. Miyamoto K. Plasma Physics for Controlled Fusion: 2nd ed. — Berlin: Springer-Verlag, 2016.

Допоміжна література:

15. Huba J.D. Revised NRL Plasma Formulary. — Washington: Naval Research Laboratory, 1998.
16. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса. — М.: Наука, 1988.
17. Horton W. Turbulent Transport in Magnetized Plasmas // Singapore: World Scientific Books, 2012, Chapter 1.
18. AbuTaha A.F. Cold fusion – the heat mechanism // J. Fusion Energy. – 1996. – Vol. 9. – P. 345.

Навчальний контент

Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Загальний методичний підхід до викладання навчальної дисципліни визначається як комунікативно-когнітивний та професійно орієнтований, згідно з яким у центрі освітнього процесу знаходиться аспірант – суб'єкт навчання і майбутній науковець.

Лекційні заняття

Розділ 1. Засади термоядерного синтезу та магнітного утримання плазми.

Лекція 1. Основні поняття ядерного синтезу. Перспективні ядерні реакції синтезу. Основні підходи до утримання палива. Критерії займання термоядерної реакції для магнітного та інерційного утримання. Енергетичний виграш.

Лекція 2. Магнітна конфігурація токамака та стеларатора. Рівновага тороїдної плазми. Рівняння Греда-Шафранова. Шафрановський зсув. Магнітні координати. Рівновага асиметричної тороїдної конфігурації.

Лекція 3. Орбіти заряджених частинок у токамаках та стелараторах. Орбіти заряджених частинок у симетричній тороїдній магнітній конфігурації. Пролітні та захоплені частинки. Частоти орбітального руху. Радіальна ширина орбіт. Тороїдна прецесія. Особливості орбіт у стелараторі: супербананові та перехідні орбіти.

Лекція 4. Неокласичне перенесення в токамаках. Підсилення класичної дифузії тороїдністю. Струм Пфірша-Шлютера. Три режими перенесення: магнітогідродинамічний, плато, банановий. Теплопровідність. Бутстреп-струм. Спонтанне обертання.

Лекція 5. Неокласичне перенесення в стелараторах. Вплив асиметрії та супербананових орбіт. Неамбіполярність неокласичної дифузії та пов'язане з нею електричне поле. Електронний та йонний режими перенесення.

Розділ 2. Колективні процеси в плазмі токамаків.

Лекція 6. Магнітогідродинамічні (МГД) нестійкості. Енергетичний принцип в аналізі МГД-стійкості. Конвективна нестійкість та її критерії. Балонний різновид МГД-нестійкості. Гвинтова нестійкість, зовнішня та внутрішня.

Лекція 7. Тіринг-мода та магнітні острови. Фізика тіринг-моди. Нелінійна динаміка магнітного острова. Неокласичні тіринг-моди.

Лекція 8. Аномальне перенесення – 1. Стохастизація магнітного поля. Дрейфові коливання та нестійкості.

Лекція 9. Аномальне перенесення – 2. Перенесення через магнітну турбулентність. Перенесення через електростатичну турбулентність. Емпіричні скейлінги перенесення. Транспортні бар'єри.

Лекція 10. Нелінійні МГД-події. Магнітне перезамкнення. Пилчасті коливання. Нестійкість зриву.

Лекція 11. Фізика надтеплових йонів – 1. Джерела швидких йонів у термоядерній плазмі.

Функція розподілу швидких йонів. Стохастична дифузія. Механізми втрат швидких йонів.
Лекція 12. Фізика надтеплових йонів – 2. Альфвенів хвилі в неоднорідній плазмі. Альфвенів континуум та альфвенів власні моди. Альфвенівські нестійкості. Фішбон-мода.

Розділ 3. Проблеми та перспективи термоядерних досліджень.

Лекція 13. Альтернативні концепції керованого ядерного синтезу. Відкриті пастки та інші альтернативні схеми магнітного утримання. Інерційний синтез. Плазмовий фокус. Холодний синтез.

Лекція 14. Технологічні та соціальні аспекти КТС - 1. Енергетичний баланс реактора-токамака. Параметр β . Методи нагрівання плазми та підтримання струму. Перспективні режими роботи реактора.

Лекція 15. Кінетичний підхід до вивчення хвиль у плазмі - 2. Бланкет та перетворення енергії. Проблема першої стінки. Дивертор. Економічні, екологічні та безпекові аспекти термоядерної енергетики. Порівняння з іншими різновидами ядерної та неядерної енергетики.

Лекція 16. Сучасний стан та перспективи термоядерних досліджень. Досягнуті параметри пристроїв та енергетичні виграти для магнітного та інерційного утримання плазми. Токамак-реактор ITER. Європейська дорожня карта зі здійснення КТС.

Практичні заняття

Заняття 1. Опрацювання завдання 1. Спільний розбір проблемних задач завдання 1.

Заняття 2. Опрацювання завдання 1. Спільний розбір проблемних задач завдання 1.

Заняття 3. Контрольна робота 1. Перевірка засвоєння модуля 1.

Заняття 4. Опрацювання завдання 2. Спільний розбір проблемних задач завдання 2.

Заняття 5. Опрацювання завдання 2. Спільний розбір проблемних задач завдання 2.

Заняття 6. Контрольна робота 2. Перевірка засвоєння модуля 2.

Заняття 7. Опрацювання завдання 2. Спільний розбір проблемних задач завдання 2.

Заняття 8. Здача завдань.

Самостійна робота аспіранта

Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

<i>Вид самостійної роботи</i>	<i>Кількість годин</i>
Опрацювання матеріалу лекцій та літератури	25
Виконання практичних завдань	20
Підготовка до контрольних робіт	5
Підготовка до іспиту	20

Політика та контроль

Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- Правила відвідування занять: не оцінюється балами присутність або відсутність здобувача на аудиторному занятті. Відповідно до робочої навчальної програми даної дисципліни, бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях.
- Правила поведінки на заняттях: аспірант має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені робочої навчальної програми дисципліни.
- За вказівкою викладача можливе проведення занять онлайн та використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача.
- Політика дедлайнів та перескладань: якщо аспірант не проходив або не з'явився на модульної контрольної роботи (без поважної причини), його результат оцінюється у 0 балів. Перескладання результатів модульної контрольної роботи не передбачено.

- Здача практичних завдань відбувається з представленням розв'язків задач у паперовому або електронному вигляді. Аспірант мусить «захистити» розв'язки деяких задач на вибір викладача.
- При виконанні контрольних робіт та під час іспиту дозволяється використання довідкової літератури, як в паперовому вигляді, так і в інтернеті.
- Політика щодо академічної доброчесності. Положення 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 цієї 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.

Система оцінювання результатів навчання

Види контролю та система оцінювання результатів навчання

Поточний контроль: опитування за темою заняття, МКР.

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: іспит.

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

Рейтинг аспіранта з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за роботу на практичних заняттях;
- 2) за самостійні практичні завдання;
- 3) за модульні контрольні роботи (МКР);
- 4) за відповідь на екзамені.

Система рейтингових балів

1) Самостійні практичні завдання. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант за виконання самостійних практичних завдань становить $2 \times 15 = 30$ балів. Нарахування балів за одне самостійне завдання:

- повна виконання (не менше 90 % обсягу) – 13-14 балів;
- достатньо повне виконання (не менше 75 % потрібної інформації) – 9-12 балів;
- неповне виконання (не менше 60 % потрібної інформації) – 5-8 балів;
- незадовільне виконання (менше 60 % потрібної інформації) – 0 балів.

2) Практичні заняття. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на практичних заняттях становить $5 \times 2 = 10$ балів. Нарахування балів на одному практичному занятті:

- відмінна підготовка до заняття – 2 бали;
- задовільна, достатня підготовка – 1 бал.
- незадовільна підготовка – 0 балів.

3) МКР. Максимальна кількість балів за МКР становить $2 \times 10 = 20$ балів. Нарахування балів:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) – 9-10 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації або незначні неточності) – 6-8 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації та деякі помилки) – 3-5 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) – 0 балів.

4). Екзамен. Завдання містить два теоретичні питання та задачу. Кожне з яких оцінюються у 15 балів, задача – 10 балів. Всього $2 \times 15 + 10 = 40$ балів.

Нарахування балів за екзаменаційну відповідь:

- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) – 14-15 балів;

- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) – 10-13 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) – 7-9 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) – 0 балів.

Нарахування балів за екзаменаційну задачу:

- відмінний розв'язок (не менше 90 % потрібної інформації) – 9-10 балів;
- достатньо якісний розв'язок (не менше 75 % потрібної інформації) – 6-8 балів;
- неповний розв'язок (не менше 60 % потрібної інформації та помилки) – 3-5 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації та істотні помилки) – 0 балів.

Накопичування рейтингових балів з навчальної дисципліни	
Види навчальної роботи	Мах кількість балів
Виконання самостійних практичних завдань	28
Виконання практичної роботи аудиторно	12
Контрольна робота	20
Іспит	40
Максимальна кількість балів	100

Відповідність шкали оцінювання ЄКТС національній системі оцінювання та ІЯД НАНУ

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ЄКТС	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену (іспиту), диференційованого заліку, курсового проекту (роботи), практики, тренінгу	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82 – 89	B	добре	
75 – 81	C		
69 – 74	D		
60 – 68	E	задовільно достатньо	не зараховано
35 – 59	FX	незадовільно	
1 – 34	F		

Більш детальну інформацію щодо компетентностей, результатів навчання, методів навчання, форм оцінювання, самостійної роботи наведено у Робочій програмі навчальної дисципліни, див сайт ІЯД.

Силабус затверджено на засіданні вченої ради ІЯД НАНУ « 5 » липня 2023 р. Протокол № 6.