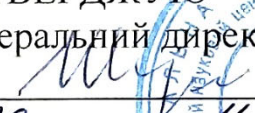


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

 Микола ШУЛЬГА

« 30 »

2022 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА
навчальної дисципліни
ФІЗИКА ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК
Назва навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Доктор філософії
галузь знань	10 Природничі науки
спеціальність	104 фізика та астрономія
освітня програма	освітньо-професійна програма «Фізика та астрономія»
спеціалізація	«Фізика пучків заряджених частинок»
вид дисципліни	обов'язкова за вибором ІНЦ ХФТІ
Інститут	Інститут плазмової електроніки і нових методів прискорення

2022 / 2023 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження
Науково-технічною радою ННЦ ХФТІ

Від “29” “11” 2022 року, протокол № 6

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Володимир ОГНІВЕНКО д.ф.-м.н., с.н.с., провідний науковий
співробітник Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорення
ННЦ ХФТІ НАН України

Програму схвалено на засіданні Науково-технічної ради Інституту
плазмової електроніки та нових методів прискорення ННЦ ХФТІ НАН
України

від “20” “09” 2022 року, протокол № 3

Директор Інституту Іван ОНІЩЕНКО член.-кор. НАН України



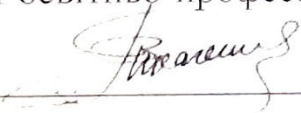
(підпис)

Іван ОНІЩЕНКО
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми «Фізика
та астрономія»

назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»



(підпис)

професор Віктор ТКАЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

Вступ

Дисципліна «Фізика пучків заряджених частинок» є частиною професійної підготовки аспірантів за вибором ННЦ ХФТІ за напрямом 10 Природничі науки, за спеціальністю – 104 фізика і астрономія, яка викладається протягом другого року навчання.

ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Метою викладання навчальної дисципліни «Фізика пучків заряджених частинок» є надання аспірантам знань фундаментальних основ фізики пучків заряджених частинок, методів їх формування і прискорення, використання пучків заряджених частинок в різних областях науки і техніки. Сформувати у аспірантів загальну компетентність у техніці прискорення і динаміки пучків заряджених частинок.

1.1. Основними завданнями вивчення дисципліни «Фізика пучків заряджених частинок» є:

(1) сформувати у аспірантів основні уявлення про методи опису пучків частинок;

(2) ознайомити зі способами формування і транспортування заряджених частинок;

(3) розглянути принципи дії, характеристики прискорювачів заряджених частинок;

(4) сформувати основні уявлення про динаміку руху та стійкість пучків заряджених частинок;

(5) ознайомити з важливішими застосуваннями пучків частинок в науці і техніці.

1.2.1. Формування інтегральних компетентностей.

Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми науково-дослідницької та інноваційної діяльності у сфері фізики, застосовувати методологію науково-дослідницької та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

1.2.2. Формування наступних загальних компетентностей.

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.

1.2.3. Формування наступних спеціальних (фахових) компетентностей.

СК01. 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.

СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

СК20 Компетенція у сфері фізики пучків заряджених частинок.

1.3. Кількість кредитів – 4.

1.4. Загальна кількість годин – 120.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни:

Опис навчальної дисципліни «Фізика пучків заряджених частинок»

Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	
Галузь знань	10 – Природничі науки
напрямок підготовки	104 – фізика та астрономія
спеціальність	
освітньо-кваліфікаційний рівень	Доктор філософії
Мова навчання	Українська, англійська
Характеристика навчальної дисципліни	
Вид	Обов'язкова за вибором ННЦ ХФТІ
Загальна кількість годин	120
Кількість кредитів ECTS	4
Форма контролю	екзамен
Показники навчальної дисципліни	
Рік підготовки	II
Лекційні заняття	32
Практичні заняття	16
Самостійна робота	70
Консультації	2

1.6. Передумови для вивчення дисципліни.

Дисципліна «Фізика пучків заряджених частинок» є обов'язковою дисципліною, знання якої становлять основу освіти майбутнього спеціаліста експериментатора у галузях фізики прискорювачів, фізики пучків заряджених частинок, ядерної фізики, фізики плазми, фізичного матеріалознавства та наукоємних фізичних технологій.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми здобувачі повинні:

Мати ступень магістра (освітньо-кваліфікаційного рівня «спеціаліст»). Володіти основами математичного аналізу, знаннями з таких розділів фізики, як механіка, теорія поля, електродинаміка, статистична фізика, квантова механіка.

1.7. Заплановані результати навчання.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми здобувачі повинні:

РН 5. Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики (астрономії) та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

РН 6. 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.

РН21. Знати фізичні основи колективних взаємодій заряджених частинок з електромагнітними хвилями; основні процеси їх нелінійної взаємодії; процеси утворення кільватерних полів; методи опису нелінійної еволюції амплітуд полів; механізмів, що обмежують збільшення електричних полів; фізичні основи методів прискорення заряджених частинок; принципи роботи лінійних і циклічних прискорювачів. Уміти визначати ключові механізми взаємодії інтенсивних електромагнітних хвиль з пучками заряджених частинок; визначати характерний час розвитку нестійкостей та інтенсивність полів, що збуджуються; розраховувати характеристики електродинамічних структур, полів, а також параметрів плазми, для забезпечення належного темпу прискорення заряджених частинок; визначати умови транспортування заряджених частинок; проводити розрахунок динаміки пучків заряджених частинок.

Після вивчення курсу здобувач повинен знати:

1. основні уявлення про пучки заряджених частинок та методи їх опису;
2. способи формування і транспортування заряджених частинок;
3. принципи дії, характеристики прискорювачів заряджених частинок;
4. основні уявлення про динаміку руху та стійкість пучків заряджених частинок;
5. фізичні основи колективних взаємодій заряджених частинок з електромагнітними хвилями;
6. основні процеси їх нелінійної взаємодії;
7. процеси утворення кільватерних полів;
8. методи опису нелінійної еволюції амплітуд полів;
9. механізмів, що обмежують збільшення електричних полів;
10. фізичні основи методів прискорення заряджених частинок; принципів роботи лінійних і циклічних прискорювачів;
11. важливіші застосування пучків частинок в науці і техніці.

В результаті вивчення дисципліни аспірант повинен уміти:

1. Використовувати методи опису пучків заряджених частинок.
2. Визначати умови формування та транспортування заряджених частинок.
3. Розраховувати основні параметри прискорювачів заряджених частинок.
4. Проводити розрахунки динаміки пучків заряджених частинок, визначати їх стійкість.
5. Визначати ключові механізми взаємодії інтенсивних електромагнітних хвиль з пучками заряджених частинок.
6. Визначати характерний час розвитку нестійкостей та інтенсивність полів, що збуджуються.
7. Розраховувати характеристики електродинамічних структур, полів, а також параметрів плазми, для забезпечення належного темпу прискорення заряджених частинок.
8. Під керівництвом досвідчених спеціалістів приймати участь в застосовуванні пучків заряджених частинок в науці та техніці.

Контроль знань аспіранта здійснюється за модульно-рейтинговою системою.

2. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Зміст навчальної дисципліни

ТЕМА 1. Фізичні основи методів прискорення заряджених частинок. Основні поняття, принципи прискорення заряджених частинок.

Історія розвитку прискорювачів. Рівняння руху заряджених частинок у електромагнітних полях. Високовольтне прискорення. Індукційне прискорення. Резонансне прискорення: лінійні резонансні прискорювачі, циклічні резонансні прискорювачі. Автофазування. Прискорення рівноважної частинки, вираз для рівноважної фази: - у лінійних прискорювачах, у циклічних прискорювачах. Фазовий рух і автофазування в лінійних прискорювачах. Рівняння, що описує фазові коливання. Малі відхилення. Частота фазових коливань. Амплітуда фазових коливань, загасання фазових коливань. Великі фазові коливання: припустимий розкид по швидкості. Врахування релятивізму швидкості. Фазові траєкторії, їхня структура. Синхротронні коливання. Джерела пучків заряджених частинок. Транспортування заряджених частинок.

ТЕМА 2. Стійкість і фокусування пучків.

Стійкість ідеальних орбіт у циклічному прискорювачі. Аксіальна стійкість. Радіальна стійкість. Бетатронні коливання. Фокусування неоднорідним магнітним полем. Слабке фокусування, сильне (жорстке) фокусування. Опис системи частинок у фазовому просторі. Фазова площа, фазові траєкторії. Теорема Ліувілля. Емітанс пучка. Аксептанс каналу транспортування. Радіальна та поздовжня стійкість у вакуумних лінійних прискорювачах. Вплив прискорювального поля на фокусування. Фокусування за допомогою зовнішнього магнітного поля.

ТЕМА 3. Радіаційні ефекти в циклічних прискорювачах.

Випромінювання електронів у циклічних прискорювачах (синхротронне випромінювання). Властивості випромінювання: потужність випромінювання, спектр випромінювання. Радіаційне тертя. Некогерентні втрати енергії. Когерентні втрати. Вплив синхротронного випромінювання на динаміку руху електронів. Квантові флуктуації випромінювання і їх дія на динаміку заряджених частинок. Зміна середньоквадратичного розкиду по енергії.

ТЕМА 4. Опис і конструкції прискорювачів.

Електростатичні прискорювачі. Індукційні прискорювачі. Бетатрони. Лінійні індукційні прискорювачі. Циклічні резонансні прискорювачі. Діагностика пучків заряджених частинок.

ТЕМА 5. Лінійні резонансні прискорювачі.

Основи електродинаміки. Поширення хвиль у періодичній структурі. Основні характеристики прискорювальних систем: фазова швидкість, амплітуда прискорювальних гармонік, потік потужності й групова швидкість. Дисперсійні характеристики діафрагмованого хвилеводу. Динаміка релятивістських частинок у лінійних резонансних прискорювачах. Поздовжній рух у полі хвилі з фазовою швидкістю близької до c . Фазові траєкторії. Зміна енергії й фази в процесі прискорення.

ТЕМА 6. Установки із зустрічними пучками.

Метод зустрічних пучків. Накопичення легких частинок. Накопичення важких частинок. Електронне охолодження. Стохастичне охолодження. Прискорювально-накопичувальні комплекси. Лінійні колайдери. Світимість пучків.

ТЕМА 7. Нові методи прискорення заряджених частинок.

Основні ідеї колективних методів прискорення. Прискорення хвилями густини заряду в плазмі. Кільватерні хвилі у плазмі, що утворюються пучками заряджених частинок. Прискорення лазерним випромінюванням.

ТЕМА 8. Фізичні основи колективних взаємодій пучків заряджених частинок.

Черенковське збудження електромагнітних хвиль зарядженими частинками. Збудження поляризаційних коливань зарядженими частинками у плазмі. Аномальний і нормальний ефекти Доплера. Магнетрон. Мазер на циклотронному резонансі. Пучки заряджених частинок у зовнішніх періодичних полях. Розсіяння електромагнітних хвиль пучками заряджених частинок. Умови резонансу. Лазери на вільних електронах.

ТЕМА 9. Сильнострумові електронні й іонні пучки.

Сильнострумові діоди. Струм і напруга в плоскому діоді. Парапотенційний режим. Сильнострумовий діод з магнітною ізоляцією. Сильнострумовий іонний діод. Транспортування пучків. Електростатичний граничний струм. Інжекція сильнострумових пучків у плазму й газ.

ТЕМА 10. Застосування пучків заряджених частинок і прискорювачів. Фізика високих енергій. Пучковий керований термоядерний синтез.

Одержання й використання синхротронного випромінювання, ондуляторного випромінювання, гальмівного випромінювання. Лазери на вільних електронах. Електронно-пучкове зварювання, імплантація іонів, дефектоскопія, радіаційна терапія, виробництво радіонуклідів, стерилізація.

Структура навчальної дисципліни

Назва лекції			
	Лекції	Практичні/семінарські заняття	Самостійна робота
Тема 1. Фізичні основи методів прискорення заряджених частинок. Основні поняття, принципи прискорення заряджених частинок.	4	2	9
Тема 2. Стійкість і фокусування пучків.	4	2	9
Тема 3. Радіаційні ефекти у циклічних прискорювачах.	2	1	4
Тема 4. Опис і конструкції прискорювачів.	2	1	4
Тема 5. Лінійні резонансні прискорювачі.	4	2	9
Тема 6. Установки із зустрічними пучками.	2	2	5
Тема 7. Нові методи прискорення заряджених частинок.	4	2	9
Тема 8. Фізичні основи колективних взаємодій пучків заряджених частинок.	4	2	9
Тема 9. Сильнострумові електронні й іонні пучки.	4	2	9
Тема 10. Застосування пучків заряджених частинок і прискорювачів.	2	0	3
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

№ з/п	Тема	Години
1	Принципи високовольтного; індукційного; резонансного прискорення, автофазування.	2
2	Стійкість і фокусування в лінійних прискорювачах, в циклічних прискорювачах.	2
3	Вплив випромінювання на рух пучків з прискоренням.	2
4	Зустрічні пучки частинок.	2
5	Динаміка пучків у лінійних резонансних прискорювачах.	2
6	Збільшення енергії пучків у нових методах прискорення.	2
7	Фізичні механізми колективних взаємодії пучків заряджених частинок.	2
8	Динаміка руху сильнотрумових пучків.	2
	Всього	16

Самостійна робота

№ з/п	Тема	Години
1	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників розділу та вивчення матеріалу за темами 1-5	35
2	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників розділу та вивчення матеріалу за темами 6-10	35
	Всього	70

Запитання для самоперевірки

1. Що обмежує енергію в електростатичному прискорювачі?
2. Чим обмежено приріст енергії на одиницю довжини при індукційному прискоренні?
3. В яких прискорювачах використовується принцип автофазування?
4. Чим відрізняється механізм автофазування в лінійних і циклічних прискорювачах?
5. Як вплинуло на розвиток прискорювачів сильне фокусування?
6. В чому полягає ідея зустрічних пучків?
7. Поясніть дефокусуючу дію поля, що прискорює в лінійних резонансних прискорювачах.
8. Порівняти частоту лінійних фазових коливань частинок з частотою поля, що прискорює.

9. Поясніть чому всі гармоніки хвилі в періодичній структурі мають однакову групову швидкість?
10. Як залежить від енергії релятивістської зарядженої частинки потужність синхротронного випромінювання?
11. В чому полягають труднощі безпосереднього використання полів лазерів у вакуумі для прискорення заряджених частинок?
12. Які умови когерентного розсіяння хвилі згустком заряджених частинок?
13. Яке максимальне прискорююче поле можна отримати у плазмі?
14. Чому сильноточкові прискорювачі працюють, в основному, в субмікросекундному діапазоні?

Запитання до екзамену

1. Принцип дії електростатичного прискорювача.
2. Описати принцип роботи індукційного прискорювача заряджених частинок.
3. Описати принцип роботи лінійного резонансного прискорювача.
4. Механізм автофазування заряджених частинок у лінійному прискорювачі.
5. Циклічна схема резонансного прискорення.
6. Частота лінійних фазових коливань частинок в лінійному прискорювачі.
7. Структура фазових траєкторій в резонансному прискорювачі. Великі фазові коливання.
8. Фокусування заряджених частинок неоднорідним магнітним полем в циклічних прискорювачах. Слабке і сильне фокусування.
9. Поздовжня і поперечна стійкість заряджених частинок у полі хвилі, що біжить.
10. Описати вплив поля, що прискорює, на фокусування частинок.
11. Знайти частоту бетатронних коливань в циклічних прискорювачах.
12. Електромагнітне випромінювання в циклічних прискорювачах (синхротронне випромінювання). Потужність випромінювання, кутовий розподіл та його спектр.
13. Поздовжній рух заряджених частинок в лінійному прискорювачі в полі хвилі з фазовою швидкістю, що дорівнює швидкості світла.
14. Динаміка руху релятивістських заряджених частинок в полі, що прискорює, поблизу вісі циліндричного хвилеводу. Умови стійкості радіального і фазового руху.
15. Фокусування заряджених частинок поздовжнім магнітним полем в лінійних резонансних прискорювачах.
16. Метод зустрічних пучків. Ефективна енергія зіткнення частинок.
17. Збудження поздовжніх полів на биттях зовнішніх поперечних монохроматичних електромагнітних хвиль у плазмі.
18. Черенковське випромінювання заряджених частинок у заломлювальному

середовищі.

19. Збудження поляризаційних коливань зарядженими частинками в плазмі.
20. Кільватерні поля електронного пучка в плазмі.
21. Сильнострумний плоский електронний діод.
22. Транспортування сильнострумного електронного пучка з частковою компенсацією об'ємного заряду.
23. Електростатичний граничний струм релятивістського електронного пучка у вакуумі.
24. Протони прискорюються в лінійному прискорювачі частинок. Початкова кінетична енергія протонів W_0 , кінцева кінетична енергія протонів W_f , напруженість електричного поля, що прискорює E_m , кут синхронної фази ϕ градусів. Яка довжина прискорювача частинок?
25. Протони прискорюються в лінійному прискорювачі частинок. Початкова кінетична енергія протонів: W_0 . Кінцева кінетична енергія протонів: W_f . Напруженість електричного поля, що прискорює: E_m . Кут синхронної фази ϕ , довжина хвилі λ . Яка частота малих (лінійних) фазових коливань? Скільки фазових коливань буде на довжині прискорення?
26. Пучок електронів з енергією W падає на нерухому мішень. Яка еквівалентна енергія в центрі інерції піде на реакцію? Яку енергію повинен мати електронний пучок при зіткненні з нерухомою мішенню, щоб отримати еквівалентну енергію в центрі інерції, таку, як при зіткненні двох зустрічних пучків з енергією кожного W ?
27. Електронний пучок з енергією W обертається в постійному магнітному полі H на рівноважному радіусі R . Знайти: (а) величину магнітного поля H , необхідного для обертання електронів на радіусі R ; (б) втрати енергії електрона за один оборот; (в) довжину хвилі випромінювання максимальної спектральної інтенсивності.
28. Яке електричне поле, що прискорює заряджені частинки, може бути збуджено в плазмі, густина якої дорівнює n_p ?
29. Протони з енергією W рухаються в полі, що прискорює, з параметрами: амплітуда поля E_m , довжина хвилі λ , синхронна фаза ϕ градусів. Яке зовнішнє магнітне поле потрібно для фокусування заряджених частинок?
30. Електрони з енергією W рухаються в ондуляторі з періодом λ_u і амплітудою магнітного поля H . Яка довжина хвилі випромінювання вздовж напрямку руху електронів? Яка втрата енергії на одиницю довжини руху частинки?
31. Яку густину струму можна отримати у плоскому діоді при напрузі U , та зазорі L ?

Методи контролю

Складання колоквіумів за темами практичних/семінарських занять, письмовий екзамен.

Схема нарахування балів

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
	за чотирирівневою шкалою оцінювання
90-100	відмінно
70-89	добре
50-69	задовільно
1-49	незадовільно

Критерії оцінювання

питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)

Екзаменаційний білет (контрольна робота) містить кілька завдань (теоретичні питання або задачі). Кожне завдання має свій ваговий бал (вказується у дужках біля питання) та оцінюється окремо. Сумарно за всі відповіді на екзаменаційні питання можна отримати максимально 40 балів. Сумарний бал за контрольну роботу вказується в тексті відповідної роботи.

№	Характеристика відповіді на кожне з питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)	% від max балу за відповідь на питання
1	Повна та вірна відповідь на питання або у повному обсязі правильно вирішена практична задача білету	100 %
2	Повна відповідь з незначними помилками (або незначні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули)	80-95 %
3	Неповна, але вірна відповідь (або значні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули для розв'язання практичних завдань)	50-80 %
4.	Відповідь повна, але містить грубі помилки (або вирішення практичних завдань білету містить грубі помилки, розрахункові формули для розв'язання практичних завдань містять помилки)	30-50 %
5	Неповна відповідь з суттєвими помилками	5-30 %
6	Невірна відповідь	0-5 %
7	Відсутня відповідь на теоретичне питання (або відсутнє вирішення практичних завдань білету)	0 %

9. Рекомендована література

Основна література

1. Jackson J. Classical electrodynamics. New York, 1962.
2. Miller R.B. An introduction to the physics of intense charged particle beams. Plenum Press, New York 1982.
3. Lawson J. The physics of charged-particle beams. Clarendon Press Oxford, 1977.
4. Livingood J. Principles of cyclic particle accelerators. Princeton 1961.
5. Marshall T. Free-Electron Lasers. New York. 1985.

Допоміжна література

1. Accelerators 2014. Highlights and Annual Report. Deutsches Elektronen-Synchrotron. Hamburg, Germany.
2. Krasilnikov M. Development of a photo cathode laser system for quasi ellipsoidal bunches at a high brightness photo injector. Helmholtz Gesellschaft, Berlin, 2014.
3. Computer techniques for electromagnetics Edit. by R. Mittra. Pergamon Press, 1973.
4. Lichtenberg A. Phase-space dynamics of particles. John Wiley and Sons, inc.

Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <http://home.cern/>
2. http://www.desy.de/research/accelerators/index_eng.html.
3. <https://www.linearcollider.org/>
4. <http://www.fnal.gov/directorate/icfa/index.html>