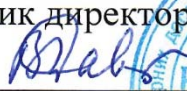


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник директора з наукової роботи
 В. В. Давидовський

« 09 » жовтня 2024 р.



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ
ФІЗИКА ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

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

Фізика пучків заряджених частинок: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2024 . - 39 с.

Укладач: Літовко І. В., доктор фізико-математичних наук, пров. науковий співробітник

Ухвалено на засіданні Вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України

протокол № 10 від “ 8 ” жовтня 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ
ФІЗИКА ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

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 пучків заряджених частинок**» 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 пучків заряджених частинок**» є необхідною 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 пучків заряджених частинок, з загально-фізичними властивостями пучків заряджених частинок та сучасними методами їх дослідження.

Курс «**Фізика пучків заряджених частинок**» 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 (90 год.). Загальна кількість годин, відведених на опанування дисципліни – 140 (4 кредити ЄКТС).

Мета дисципліни – ознайомлення аспірантів з основними положеннями фізики пучків заряджених частинок, з головними характеристиками пучків заряджених частинок і напрямками їх використання та дослідження.

Завдання – сформувати у аспірантів базові знання про загальні знання про характеристики та властивості пучків заряджених частинок, про теоретичні та експериментальні дослідження в фізиці заряджених частинок та прискорювальної техніки, математичне моделювання фізичних процесів формування, транспортування та прискорення пучків заряджених частинок.

Структура курсу

У результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен:

Знати: теоретичні і прикладні аспекти формування, фокусування, транспортування і прискорення пучків заряджених частинок; фундаментальні явища в області фізики пучків заряджених частинок і прискорювальної техніки; теоретичні і експериментальні методи і апаратуру для створення та прискорення пучків заряджених частинок і дослідження їх характеристик; математичні методи для моделювання фізичних процесів, які відбуваються у пучках на різних етапах: формування, транспортування і взаємодії з мішенями.

Вміти: проводити теоретичні або експериментальні дослідження в області фізики пучків заряджених частинок і прискорювальної техніки, розробляти математичні моделі в області динаміки пучків; застосовувати методи розрахунків і численної оцінки точності результатів фундаментальних

та прикладних досліджень із застосуванням комп'ютерних технологій і методів математичного моделювання, аналітичної та графічної обробки результатів вимірювання. 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 пучків заряджених частинок**» 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 пучків заряджених частинок**» використовуються знання та вміння, набуті аспірантами під час вивчення курсів загальної фізики, електродинаміки, атомної фізики, статистичної фізики, квантової механіки, основ фізики плазми.

II. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№	Назва теми	Кількість годин				
		Всього	Лекцій	Практичних занять	Самостійна та індивідуальна робота	Консультації
	Розділ (змістовний модуль) 1. Фізика пучків заряджених частинок	-	-	-	-	-
	Тема 1. Вступ. Загальні питання фізики пучків та заряджених частинок	5	2	-	3	-
	Тема 2. Джерела пучків заряджених частинок	8	2	-	6	-
	Тема 3. Транспортування пучків заряджених частинок.	10	2	2	6	-
	Тема 4. Методи та способи формування пучків частинок різного сорту	8	2	-	6	-
	Тема 5. Прискорення заряджених частинок	10	2	2	6	-
	Тема 6. Інтенсивні та сильно струмові пучки заряджених частинок	8	2	-	6	-
	Тема 7. Електронні та іонні пучки та їх використання	10	2	2	6	-
	Тема 8. Математичне моделювання пучків заряджених частинок	10	2	2	6	-
	Всього по розділу 1	69	16	8	45	-
	Розділ (змістовний модуль) 2. Прискорювальна техніка					
	Тема 9. Техніка прискорення та формування пучків заряджених частинок	10	2	-	8	-
	Тема 10. Електростатичні генератори	10	2	2	6	
	Тема 11. Лінійні прискорювачі	10	2	2	6	
	Тема 12. Оптика пучків заряджених частинок	10	2	2	6	
	Тема 13. Діагностика та детектори пучків заряджених частинок	10	2	-	6	
	Тема 14. Синхротрони та синхротронне випромінювання	8	2	-	6	
	Тема 15. Зустрічні пучки	8	2	2	6	
	Тема 16. Проходження пучків через речовину, взаємодія з поверхню, прикладні застосування	8	2	-	6	
	Всього по розділу 2	69	16	8	45	-
	Іспит	-	-	-	-	2
	Всього	140	32	16	90	2

ЗМІСТ КУРСУ

Розділ (змістовний модуль) 1. Фізика пучків заряджених частинок

ТЕМА 1. Вступ. Загальні питання фізики пучків та заряджених частинок

Опис дисципліни. Мета і завдання курсу. Загальне визначення пучка частинок. Фазовий простір та поняття ансамблю частинок в застосуванні до опису пучків. Рівняння руху заряджених частинок в електромагнітних полях. Система рівнянь Максвелла. Власні поля пучків. Рівняння Власова. Рівняння Фоккера-Планка. Самоузгоджене поле. Просторова дисперсія в плазмі. Діелектрична проникність плазми без зіткнень. Загасання Ландау. Діелектрична проникність максвеллової плазми. Поздовжні плазмові хвилі. Іонно-звукові хвилі. Релаксація початкового збурення.

ТЕМА 2. Джерела пучків заряджених частинок.

Електрона емісія: термoeмісія, автоемісія, плазмова емісія, фотоемісія. Основні характеристики катодів на основі кожного з видів емісії. Електронні гармати. Формування пучків. Первеанс, еміттанс, яскравість пучків. Формування електронних пучків з малим еміттансом. Типи електронних гармат. Іонні джерела. Механізми генерації позитивних, негативних, поляризованих іонів. Формування пучків. Первеанс, еміттанс, яскравість пучків. Типи іонних джерел.

ТЕМА 3. Транспортування пучків заряджених частинок .

Транспортування пучків в повздовжньому магнітному поле. Теорема Буша. Джерело у магнітному поле; екранування. Магнітні і електростатичні лінзи з повздовжніми і поперечними полями: аксіально-симетричні, циліндричні, квадрупольні, мультипольні. Фокусна відстань лінзи. Магнітні лінзи з азимутальним полем: параболічні, плазмові лінзи. Поворотні магніти, їх фокусувальні властивості. Градієнтне і краєві фокусування. Матриця перетворення пучку. Електростатичні відхиляючі пристрої. Фокусувальні властивості, матриця перетворення. Матричний аналіз руху частинок в каналі. Опис пучків в фазовому просторі. Фазові еліпси. Рівняння моментів і огинаючих пучків частинок. Оптичні системи з квадрупольних лінз та відхиляючих магнітів. Симетричні без дисперсійні і ізохронні системи. Аберацийні ефекти.

ТЕМА 4. Методи та способи формування пучків частинок різного сорту

Передача енергії між електронами і іонами. Довжина пробігу частинок в плазмі. Лоренцова плазма. Збігаючий інтеграл зіткнень. Взаємодія через плазмові хвилі. Поглинання в плазмі в високочастотних межах. Квазілінійна теорія загасання Ландау. Кінетичне рівняння для релятивістської плазми.

Флуктуації в плазмі. Методи витягу прискорених пучків з циклічного прискорювача. Поділ витягнутих пучків на частини. Взаємодія витягнутих пучків з мішенню. Вихід вторинних частинок. Методи сепарації заряджених частинок по масі. Електростатичні і високочастотні сепаратори та їх можливості.

ТЕМА 5. Прискорення заряджених частинок.

Прискорення в статичних і квазістатичних електричних полях. Прискорювачі прямої дії. Динаміка пучка при прискоренні в постійному електричному полі, дія просторового заряду.

Імпульсне прискорення іонів в вакуумних діодах з магнітною ізоляцією; пінч-діоди. “Газодинамічний” метод прискорення іонів.

Прискорення частинок у вихровому електричному полі. Бетатрон.

Лінійні прискорювачі. Особливості прискорювачів електронів, протонів і важких іонів. Інжекція частинок в лінійний прискорювач. Динаміка частинок в лінійних прискорювачах. Особливості транспортування частинок в лінійних прискорювачах, вплив просторового заряду та випромінювання пучка. Високочастотне фокусування. Фазо-змінне фокусування. Квадрупольне високочастотне фокусування. Динаміка пучка в каналі з просторово-однорідної квадрупольної високочастотної фокусування (ПОКФ).

Циклічні прискорювачі. Фазовий рух частинок, повздовжній фазовий об’єм пучку. Адіабатичне загасання фазових коливань.

Методи генерації прискорювального електромагнітного поля: згустками електронів, плазмовими коливаннями, електронними пучками, які рухаються.

ТЕМА 6. Інтенсивні та сильно струмові пучки заряджених частинок.

Пучок заряджених частинок в вакуумі. Віртуальний катод; граничний Транспортування інтенсивних пучків. Бріллюєнівський потік.

Транспортування інтенсивних пучків в газі та плазмі. Зворотній струм. Нестійкості пучків, вплив повздовжнього магнітного поля на стійкість пучків. Колективні страти енергії пучку в плазмі. Компенсація просторового заряду і струму електронного пучка. Релятивістський стабілізований пучок.

Просторовий заряд пучка в циклічних прискорювачах. Кулонівський здвиг частот поперечних коливань.

Взаємодія інтенсивних пучків зі структурою каналу транспортування і прискорювальною системою. Загасання когерентних коливань. Нестійкість пучків. Внутрішньо-пучкове розсіяне.

ТЕМА 7. Електронні та іонні пучки та їх використання

Взаємодія іонних та електронних пучків з речовиною. Механізми проникнення в речовину, ефективність перетворення кінетичної енергії пучку на тепло, кінетика теплових процесів у зоні взаємодії пучків з речовиною. Магнетрони. Використання іонних та електронних пучків для обробки матеріалу, модифікація властивостей речовини, обробка речовини, отримання матеріалів

з заданими властивостями, імплантація, іонне розпилення, вакуумне-дугове випаровування, внесення дефектів.

ТЕМА 8. Математичне моделювання пучків заряджених частинок

Математичні моделі пучків. Ламінарні пучки і гідродинамічне наближення. Неламінарні пучки без зіткнень. Пучки із зіткненням і дисипацією. Метод великих частинок. Методи розв'язування рівнянь Пуассону і Максвелла. РС-код як метод дослідження, Опис взаємодії частинок і полів, Закон Чайльда-Ленгмюра, біполярний вакуумний діод, транспортування пучку заряджених частинок, моделювання нестационарний та стаціонарний плазмовий катод.

Розділ (змістовний модуль) 2. Прискорювальна техніка

ТЕМА 9. Техніка прискорення та формування пучків заряджених частинок.

Прискорювачі прямої дії: каскадні прискорювачі, електростатичні прискорювачі Ван-де-Граафа. Генератори імпульсної напруги. Формуючі лінії, конденсатори-накопичувачі. Робочий діапазон прискорювачів прямої дії, їх параметри. Комутація імпульсної напруги. Прикладні використання прискорювачів прямої дії.

Лінійні прискорювачі. Загальні характеристики принципу їх дії і конструкції, переваги і недоліки у порівнянні з кільцевими прискорювачами. Основні системи лінійних прискорювачів в комплексі.

Індукційні прискорювачі. Бетатрон. Лінійний бетатрон. Особливості конструкції, параметри.

Магнітні системи циклічних прискорювачів. Конструктивні особливості елементів магнітної системи (соленоїди, диполі, квадруполі, лінзи вищих порядків). Використання постійних магнітів.

Вакуумні системи прискорювачів. Методи отримання високого та понад-високого вакууму, виміри тиску остаточного газу, аналіз його складу.

Системи інжекції і витягу пучка. Інжекція в циклічні прискорювачі, багато-обертальна інжекція, перезарядна інжекція. Швидкий та повільний витяги пучку.

ТЕМА 10. Електростатичні генератори.

Схема конструкції пристрою електростатичного генератора. Теорія процесу прискорення заряджених частинок в електростатичному генераторі. Режим роботи. Максимально досяжна енергія заряджених частинок. Аналізуючи магніти. Джерела заряджених іонів. Мішені.

ТЕМА 11. Лінійні прискорювачі.

Принцип багаторазового прискорення. Високочастотні генератори. Теорія прискорення заряджених іонів в лінійних прискорювачах. Гранична енергія

електронів в лінійному прискорювачі. Протонний лінійний прискорювач відбору для оптичних процесів.

Лінійні прискорювачі електронів. Типи прискорювальних систем, варіанти зі стоячої і біжучою хвилями. Особливості конструкції і основні параметри машин для прикладних застосувань.

Лінійні прискорювачі протонів та іонів. Іонні джерела. Особливості резонаторів і прискорювальних структур для іонів різних енергій.

ТЕМА 12. Оптика пучків заряджених частинок

Магнітні лінзи. Теорія руху заряджених частинок в магнітному полі. Жорстке фокусування. Чотириполосні магніти. Фокусна відстань лінзи. Магнітні лінзи з азимутальним полем: параболічні, плазмові лінзи. Поворотні магніти, їх фокусуючі властивості. Градієнтне и краєві фокусування.

ТЕМА 13. Діагностика та детектори пучків заряджених частинок.

Імпульсні іонізаційні і пропорціональні камери, дрейфові камери, сцинтиляційні лічильники, мікростріпові детектори, бульбочкова камера, черенковські лічильники, кільцевий черенковський спектрометр. Іскрові і стриммерні камери. Методи ідентифікації частинок.

Методи виміру енергії: магнітні спектрометри, іонізаційні калориметри, детектори перехідного випромінювання. Основні вимоги до трекових детекторів і калориметрів.

Вимір струму пучка. Імпульсні пучки, пояс Роговського, ємкісні датчики струму. Неперервні пучки – вимір магнітного поля пучка. Монітори витягнутих пучків, циліндр Фарадея. Вимір емітансу пучка.

Контроль профілю пучка. Ємкісні і магнітно-індукційні датчики. Вторинно-емісійні детектори, методи тонкої мішені. Контроль пучка по світінню остаточного газу.

Контроль параметрів електронних, позитронних пучків в накопичувачах по синхротронному випромінюванню.

ТЕМА 14. Синхротрони та синхротронне випромінювання.

Прискорювач з круговою траєкторією пучків - циклотрон. Принципіальна схема пристрою синхротрона. Радіочастотні підсилювальні пристрої. Залежність енергії зарядженої прискореної частинки від параметрів прискорювача. Синхротронне випромінювання. Використання синхротронного випромінювання в спектроскопії твердого тіла.

Синхротронне випромінювання и радіаційне тертя. Основні характеристики синхротронного випромінювання, його використання. Рух частинок в прискорюваче (каналі транспортування) в присутності синхротронного випромінювання. Декрименти загасання коливань частинок. Усталений розмір пучка. Генератори синхротронного випромінювання.

Іонізаційне тертя. Основні характеристики метода, межі його використання
Електронне охолодження. Основні характеристики метода, його використання

ТЕМА 15. Зустрічні пучки.

Лабораторна система відліку и система відліку центра мас. Закони збереження для частинок які зіштовхуються. Релятивістська інваріантність. Енергія зустрічних пучків. Вакуумна техніка. Протонні накопичувальні кільця. Радіочастотні прискорювальні резонатори. Основні характеристики метода: енергія реакції, світність. Циклічні і лінійні пучки. Накопичення заряджених частинок. Методи конверсії, багатократне накопичення в заданий фазовий об'єм, охолодження. Обмеження світності установки з зустрічними пучками. Ефекти зустрічі. Час життя пучка в накопичувачі. Взаємодія пучка с остаточноим газом і зустрічним пучком. Вплив охолодження

ТЕМА 16. Проходження пучків через речовину, взаємодія з поверхню, прикладні застосування

Довжина вільного пробігу. Рух важких заряджених частинок в речовині. Питомі втрати енергії. Фотоелектричний ефект. Ефект Комптона. Народження електрон-позитронних пар. Втрати енергії електронів в речовині. Кулонівське розсіювання. Гальмівне випромінювання. Каскадні ливні. Люмінесцентне випромінювання конденсованих середовищ, збуджене електронним пучком. Порівняння зі спектрами фотолюмінесценції. Розпізнання типу молекулярних середовищ по спектрам електронно-збудженої люмінесценції. Спектральне обладнання. Застосування прискорювачів в медицині. Отримання короткоживучих радіоізотопів для радіофармпрепаратів. Терапевтичні аспекти застосування прискорювачів.

Застосування прискорювачів у промисловості: дефектоскопія, стерилізація, огляд вантажів та багажу

Література

Основна

1. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1978.
2. Г. Фраунфельдер, Э. Хенли. Субатомная физика. Издательство «Мир», Москва, 1979 г.
3. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980
4. "Квантовая электроника". Маленькая энциклопедия, М., 1969.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. М., 1976.
6. Страховский Г.М., Успенский А.В. "Основы квантовой электроники", Изд-во Высшей школы, М., 1973.
7. Силин В.П. «Введение в кинетическую теорию газов», Москва, Наука, 1971 г.
8. Коломенский А.А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М.: Изд-во МГУ, 1980.

9. Форрестер Ф.Т. Интенсивные ионные пучки. М.: Мир, 1992.
10. Карташев В.П., Котов В.И. Основы магнитной оптики пучков заряженных частиц высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1984.
11. Синхротронное излучение и его применения / И.М. Тернов и др. М.: Изд-во МГУ, 1990.
12. Гаврилов Н.М. Введение в физику ускоряющих систем. Ч. 1, 2. М.: МИФИ, 1990.
13. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М., 1992.
14. Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский. Физическая кинетика. М., 1979.
15. Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1978
16. Алямовский И.П. Электронные пушки и электронные пучки . М.: Советское радио, 1986.
17. Браун Я. Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998.
18. 10. Лабораторный практикум по общей физике. Т.3. Под ред. Ю.М. Ципенюка – М.: Из-во МФТИ, 1998 г.
19. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. В 3 т. М.: Энергоиздат, 1981-1983; 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991.
20. Мешков И.Н. Основные тенденции развития ускорителей // 16-е совещ. по ускорит. зарядж. част. Т. 1. Протвино, 1998.
21. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
22. Мешков И.Н. Транспортировка пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1991.
23. Вальднер О.А., Глазков А.А. Высоковольтные ускорители. М.: МИФИ, 1986.
24. Вальднер О.А., Глазков А.А. Индукционные ускорители. М.: МИФИ, 1985
25. Вальднер О.А., Глазков А.А. Новые конструкции ускорителей циклотронного типа. М.: МИФИ, 1987.
26. Вальднер О.А., Глазков А.А. Современные синхротроны. М.: МИФИ, 1989.
27. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987.
28. Будкер Г.И. Ускорители и встречные пучки.,
29. Вальднер О.А., Глазков А.А. Столкновители заряженных частиц – коллайдеры. М.: МИФИ, 1991.
30. Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ структуры. М.: Энергоиздат, 1981.
31. Ширшов Л.С. Сверхпроводящие магниты для ускорителей // Атомная техника за рубежом. 1998. № 2.
32. Глазков А.А. Вакуумные системы электрофизических установок. М.: Атомиздат, 1975.

Додаткова

1. А.С. Шварц. Элементы квантовой теории поля. Москва. Атомиздат. 1975.

2. Кузнецов С. И. Ускорители заряженных частиц. Курс физики с примерами решения задач
3. Москалев В.А., Сергеев Г.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2014. 311 стр.
4. Лазарев Н.В., Козодаев А.М. Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электроядерных установок // Атомная энергия. 2000. Т. 89, вып.6; 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 2000.
5. Салимов Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // УФН. 2000. Т. 170. № 2.
6. Капчинский И.М. Сильноточные линейные ускорители ионов // УФН. 1980. Т. 32, вып.4.
7. Рябухин Ю.С. Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980.
8. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977.
9. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Будкер Г.И., Скринский А.Н. Электронное охлаждение и новые перспективы в физике элементарных частиц//УФН. 1978. Т. 124. Вып. 4
11. Богданович Б.Ю. Линейные ускорители и физика пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991.
12. Источник синхротронного излучения третьего поколения в ОИЯИ / Н.И. Балалыкин, П.Ф. Белошинский, В.Г. Кадышевский и др. // Атомная энергия. 2001. Т. 91. Вып. 4;
13. Пархомчук В.В., Скринский А.Н. Методы охлаждения пучков заряженных частиц // ЭЧАЯ. 1981. Т. 12. Вып. 3.
14. Радиационно-физические комплексы на базе ускорителей: Сб. статей / Под ред. А.В. Шальнова. М.: Энергоатомиздат, 1983.
15. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000.
16. Прудников И.А., Соколов Н.И. Цилиндры Фарадея для измерения тока пучка заряженных частиц высоких энергий. Л.: НИИЭФА, 1983.
17. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях: Сб. науч. трудов РАИАН. М.: 1984.
18. Рис Д.П. Стэнфордский линейный коллайдер.//В мире науки. 1989. №12
19. Майерс С., Пикассо Э. Большой электрон-позитронный коллайдер // В мире науки. 1990. № 9.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

ФІЗИКА ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

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: Літовко І.В., доктор фіз.-мат. наук, в/о провід. наукового співробітника

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. Фізика пучків заряджених частинок

Заняття 1. Тема 1. Вступ. Загальні питання фізики пучків та заряджених частинок

План.

1. Мета, завдання та структура курсу. Опис дисципліни.
2. Загальне визначення пучка частинок. Фазовий простір та поняття ансамблю частинок в застосуванні до опису пучків.
3. Рівняння руху заряджених частинок в електромагнітних полях. Система рівнянь Максвелла.
4. Власні поля пучків. Самоузгоджене поле. Рівняння Власова.
5. Просторова дисперсія в плазмі. Діелектрична проникність плазми без зіткнень.
6. Поздовжні плазмові хвилі. Іонно-звукові хвилі.

Література

1. [1, с. 9-11]
2. [3, с. 38-43]
3. [9, с. 55-61]

Заняття 2. Тема 2. Джерела пучків заряджених частинок.

План.

1. Електрона емісія: термoeмісія, автоемісія, плазмова емісія, фотоемісія. Основні характеристики катодів на основі кожного з видів емісії.
2. Електроні гармати. Формування пучків. Первеанс, еміттанс, яскравість пучків. Формування електронних пучків з малим еміттансом. Типи електронних гармат.
3. Іонні джерела. Механізми генерації позитивних, негативних, поляризованих іонів. Формування пучків. Первеанс, еміттанс, яскравість пучків. Типи іонних джерел.

Література

1. [8, с. 83-87, 94-99]
2. [9, с. 43-59]
3. [15, с. 47-51]
4. [16, с. 49-85]

Заняття 3. Тема 3. Транспортування пучків заряджених частинок .

План.

1. Транспортування пучків в повздовжньому магнітному поле. Теорема Буша. Джерело у магнітному поле; екранування.
2. Магнітні і електростатичні лінзи з повздовжніми і поперечними полями: аксіально-симетричні, циліндричні, квадрупольні, мультипольні. Фокусна відстань лінзи. Магнітні лінзи з азимутальним полем: параболічні, плазмові лінзи.
3. Електростатичні відхиляючі пристрої. Фокусувальні властивості, матриця перетворення.
4. Матричний аналіз руху частинок в каналі. Опис пучків в фазовому просторі. Фазові еліпси. Рівняння моментів і огинаючих пучків частинок.
5. Оптичні системи з квадрупольних лінз та відхиляючих магнітів. Симетричні бездисперсійні і ізохронні системи. Абераційні ефекти.

Література

1. [9, с. 46-54]
2. [21, с. 73-86]

Заняття 4. Тема 4. Методи та способи формування пучків частинок різного сорту

План.

1. Передача енергії між електронами і іонами. Довжина пробігу частинок в плазмі. Лоренцова плазма. Збігаючий інтеграл зіткнень.
2. Взаємодія через плазмові хвилі. Поглинання в плазмі в високочастотних межах. Квазілінійна теорія загасання Ландау.
3. Кінетичне рівняння для релятивістської плазми. Флуктуації в плазмі.
4. Методи витягу прискорених пучків з циклічного прискорювача.
5. Поділ витягнутих пучків на частини. Взаємодія витягнутих пучків з мішенню. Вихід вторинних частинок.
6. Методи сепарації заряджених частинок по масі. Електростатичні і високочастотні сепаратори та їх можливості.

Література

1. [1, с. 113-134]
2. [2, с. 58-66]

Заняття 5. Тема 5. Прискорення заряджених частинок.

План.

1. Прискорення в статичних і квазістатичних електричних полях. Прискорювачі прямої дії. Динаміка пучка при прискоренні в постійному електричному полі, дія просторового заряду.
2. Імпульсне прискорення іонів в вакуумних діодах з магнітною ізоляцією; пінч-діоди. “Газодинамічний” метод прискорення іонів.

Прискорення частинок у вихровому електричному полі. Бетатрон.

3. Лінійні прискорювачі. Особливості прискорювачів електронів, протонів і важких іонів. Інжекція частинок в лінійний прискорювач. Динаміка частинок в лінійних прискорювачах. Особливості транспортування частинок в лінійних прискорювачах, вплив просторового заряду та випромінювання пучка.

4. Високочастотне фокусування. Фазо змінне фокусування. Квадрупольне високочастотне фокусування. Динаміка пучка в каналі з просторово-однорідної квадрупольної високочастотної фокусування (ПОКФ).

5. Циклічні прискорювачі. Фазовий рух частинок, повздовжній фазовий об'єм пучку. Адіабатичне загасання фазових коливань.

6. Методи генерації прискорювального електромагнітного поля: згустками електронів, плазовими коливаннями, електронними пучками, які рухаються.

Література

1. [3, с. 113-134]
2. [8, с. 58-66]
3. [10, с. 5-36]
4. [11, с. 150-166]

Заняття 6. Тема 6. Інтенсивні та сильно струмові пучки заряджених частинок.

План.

1. Пучок заряджених частинок в вакуумі. Віртуальний катод; граничний струм. Транспортування інтенсивних пучків. Бріллюєнівський потік.

2. Транспортування інтенсивних пучків в газі та плазмі. Зворотній струм. Нестійкості пучків, вплив повздовжнього магнітного поля на стійкість пучків. Колективні страти енергії пучку в плазмі. Компенсація просторового заряду і струму електронного пучка. Релятивістський стабілізований пучок.

Просторовий заряд пучка в циклічних прискорювачах. Кулонівський здвиг частот поперечних коливань.

3. Взаємодія інтенсивних пучків зі структурою каналу транспортування і прискорювальною системою. Загасання когерентних коливань. Нестійкість пучків.

4. Внутрішньо-пучкове розсіяне.

Література

1. [12, с. 160-171]
2. [ДЗ, с. 18-24]
3. [20, с. 101-107]
4. [21, с. 30-45]

Заняття 7. Тема 7. Електронні та іонні пучки та їх використання.

План.

1. Взаємодія іонних та електронних пучків з речовиною. Механізми проникнення в речовину, ефективність перетворення кінетичної енергії пучку на тепло, кінетика теплових процесів у зоні взаємодії пучків з речовиною.
2. Магнетрони.
3. Використання іонних та електронних пучків для обробки матеріалу, модифікація властивостей речовини, обробка речовини, отримання матеріалів з заданими властивостями, імплантація, іонне розпилення, вакуумне-дугове випаровування, внесення дефектів.

Література

1. [1, с. 160-171, 191-196]
2. [2, с.67-71]

Заняття 8. Тема 8. Математичне моделювання пучків заряджених частинок

План.

1. Математичні моделі пучків.
2. Ламінарні пучки і гідродинамічне наближення. Неламінарні пучки без зіткнень. Пучки із зіткненням і дисипацією.
3. Метод великих частинок. Методи розв'язування рівнянь Пуассону і Максвелла.
4. РС-код як метод дослідження.
5. Опис взаємодії частинок і полів, Закон Чайльда-Ленгмюра, біполярний вакуумний діод,.
6. Транспортування пучку заряджених частинок, моделювання нестационарного та стаціонарного плазмового катоду.

Література

1. [1, с. 171-191]
2. [2, с.67-71]
3. [Д2, с. 501-514]

Розділ (змістовний модуль) 2. Прискорювальна техніка

Заняття 9. Тема 9. Техніка прискорення та формування пучків заряджених частинок.

План.

1. Прискорювачі прямої дії: каскадні прискорювачі, електростатичні прискорювачі Ван-де-Граафа. Генератори імпульсної напруги. Формуючі лінії, конденсатори-накопичувачі. Робочий діапазон прискорювачів прямої дії, їх параметри. Комутація імпульсної напруги. Прикладні використання прискорювачів прямої дії.

2. Лінійні прискорювачі. Загальні характеристики принципу їх дії і конструкції, переваги і недоліки у порівнянні з кільцевими прискорювачами. Основні системи лінійних прискорювачів в комплексі.
3. Індукційні прискорювачі. Бетатрон. Лінійний бетатрон. Особливості конструкції, параметри.
4. Магнітні системи циклічних прискорювачів. Конструктивні особливості елементів магнітної системи (соленоїди, диполі, квадруполі, лінзи вищих порядків). Використання постійних магнітів.
5. Вакуумні системи прискорювачів. Методи отримання високого та понад-високого вакууму, виміри тиску остаточного газу, аналіз його складу.
6. Системи інжекції і витягу пучка. Інжекція в циклічні прискорювачі, багато-обертальна інжекція, перезарядові інжекції. Швидкий та повільний витяги пучку.

Література

1. [1, с. 171-191]
2. [2, с.67-71]
3. [Д2, с. 501-514]

Заняття 10. Тема 10. Електростатичні генератори.

План.

1. Схема конструкції пристрою електростатичного генератора.
2. Теорія процесу прискорення заряджених частинок в електростатичному генераторі.
3. Режим роботи. Максимально досяжна енергія заряджених частинок.
4. Аналізуючи магніти.
5. Джерела заряджених іонів.
6. Мішені.

Література

1. [1, с. 235-253]
2. [2, с. 75-80]
3. [Д2, с. 509-514]

Заняття 11. ТЕМА 11. Лінійні прискорювачі.

План.

- 1 Принцип багаторазового прискорення. Високочастотні генератори. Теорія прискорення заряджених іонів в лінійних прискорювачах. Гранична енергія електронів в лінійному прискорювачі. Протонний лінійний прискорювач відбору для оптичних процесів.
2. Лінійні прискорювачі електронів. Типи прискорювальних систем, варіанти зі стоячої і біжучою хвилями. Особливості конструкції і основні параметри машин для прикладних застосувань.

3. Лінійні прискорювачі протонів та іонів. Іонні джерела. Особливості резонаторів і прискорювальних структур для іонів різних енергій.

Література

1. [1, с. 200-220]
2. [Д4, с. 66-67]
3. [Д6, с. 6-67]
4. [Д11, с]

Заняття 12. Тема 12. . Оптика пучків заряджених частинок

План.

1. Магнітні лінзи. Теорія руху заряджених частинок в магнітному полі.
2. Жорстке фокусування. Чотириполюсні магніти.
3. Фокусна відстань лінзи.
4. Магнітні лінзи з азимутальним полем: параболічні, плазмові лінзи.
5. Поворотні магніти, їх фокусуючі властивості. Градієнтне и краєві фокусування.

Література

1. [1, с. 377-388]
2. [2, с. 71-75]
3. [Д2, с. 516-524]

Заняття 13. Тема 13 Діагностика та детектори пучків заряджених частинок.

План.

1. Імпульсні іонізаційні і пропорціональні камери, дрейфові камери, сцинтиляційні лічильники, мікростріпові детектори, бульбочкова камера, черенковські лічильники, кільцевий черенковський спектрометр. Іскрові і стриммерні камери. Методи ідентифікації частинок.
2. Методи виміру енергії: магнітні спектрометри, іонізаційні калориметри, детектори перехідного випромінювання. Основні вимоги до трекових детекторів і калориметрів.
3. Вимір струму пучка. Імпульсні пучки, пояс Роговського, ємкісні датчики струму. Неперервні пучки – вимір магнітного поля пучка. Монітори витягнутих пучків, циліндр Фарадея.
4. Вимір емітансу пучка. Контроль профілю пучка. Ємкісні і магнітно-індукційні датчики. Вторинно-емісійні детектори, методи тонкої мішені. Контроль пучка по світінню остаточного газу. Контроль параметрів електронних, позитронних пучків в накопичувачах по синхротронному випромінюванню.

Література

1. [1, с. 366-376]

2. [2, с. 84-92]

Заняття 14. Тема 14. Синхротрони та синхротронне випромінювання.

План.

1. Прискорювач з круговою траєкторією пучків - циклотрон. Принципіальна схема пристрою синхротрона. Радіочастотні підсилювальні пристрої. Залежність енергії зарядженої прискореної частинки від параметрів прискорювача. Синхротронне випромінювання. Використання синхротронного випромінювання в спектроскопії твердого тіла.
2. Синхротронне випромінювання и радіаційне тертя. Основні характеристики синхротронного випромінювання, його використання. Рух частинок в прискорюваче (каналі транспортування) в присутності синхротронного випромінювання
3. Декремент загасання коливань частинок. Усталений розмір пучка. Генератори синхротронного випромінювання
4. Іонізаційне тертя. Основні характеристики метода, межі його використання. Електронне охолодження. Основні характеристики метода, його використання

Література

1. [1, с. 428-451]
2. [Д1, с. 366-371, 384-385]
3. [Д2, с. 516-524]

Заняття 15. Тема 15. Зустрічні пучки.

План.

1. Лабораторна система відліку и система відліку центра мас. Закони збереження для частинок які зіштовхуються. Релятивістська інваріантність.
2. Енергія зустрічних пучків. Вакуумна техніка. Протонні накопичувальні кільця. Радіочастотні прискорювальні резонатори.
3. Основні характеристики метода: енергія реакції, світність. Циклічні і лінійні пучки.
4. Накопичення заряджених частинок. Методи конверсії, багатократне накопичення в заданий фазовий об'єм, охолодження.
5. Обмеження світності установки з зустрічними пучками. Ефекти зустрічі.
6. Час життя пучка в накопичувачі. Взаємодія пучка с остаточноим газом і зустрічним пучком. Вплив охолодження

Література

1. [1, с. 428-451]
2. [Д10, с. 366-371, 384-385]
3. [Д18, с. 516-524]
4. [Д19]

Заняття 16. Тема 16. Проходження пучків через речовину, взаємодія з

поверхню, прикладні застосування

План.

1. Довжина вільного пробігу. Рух важких заряджених частинок в речовині. Питомі втрати енергії. Фотоелектричний ефект. Ефект Комптона. Народження електрон-позитронних пар.
2. Втрати енергії електронів в речовині. Кулонівське розсіювання. Гальмівне випромінювання. Каскадні ливні.
3. Люмінесцентне випромінювання конденсованих середовищ, збуджене електронним пучком. Порівняння зі спектрами фотолюмінесценції.
4. Розпізнання типу молекулярних середовищ по спектрам електронно-збудженої люмінесценції. Спектральне обладнання.
5. Застосування прискорювачів в медицині. Отримання короткоживучих радіоізотопів для радіофармпрепаратів. Терапевтичні аспекти застосування прискорювачів.
6. Застосування прискорювачів у промисловості: дефектоскопія, стерилізація, огляд вантажів та багажу.

Література

1. [1, с. 428-451]
2. [Д1, с. 366-371, 384-385]
3. [Д2, с. 516-524]

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 аспірантами самостійно за рекомендованою тематикою;
- розв'язання задач аналітичного характеру;
- розв'язання задач обчислювального характеру;
- проведення колоквиумів по засвоєнню теоретичного матеріалу;
- виконання контрольних робіт за індивідуальним завданням;
- перевірка практичних завдань, виконаних аспірантами під час самостійної роботи;
- проведення консультацій з дисципліни;

Практичне заняття 1. Тема 3. Транспортування пучків заряджених частинок .

Контрольні питання:

1. Теорема Буша.
2. Екранування.
3. Транспортування пучків в повздовжньому магнітному полі.
4. Магнітні і електростатичні лінзи з повздовжніми і поперечними полями.
5. Фокусна відстань лінзи.
6. Плазмові лінзи
7. Опис пучків в фазовому просторі.
8. Рівняння моментів і огинаючих пучків частинок.
9. Абераційні ефекти.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Матричний аналіз руху частинок в каналі. Фазові еліпси.
2. Джерело у магнітному полі.
3. Фокусувальні властивості електростатичні відхиляючі пристрої
4. Матриця перетворення.
5. Симетричні бездисперсійні і ізохронні системи

Література:

Основна: [3,6]

Додаткова: [1,2]

Практичне заняття 2. Тема 5. Прискорення заряджених частинок.

Контрольні питання:

1. Прискорення в статичних і квазістатичних електричних полях
2. Динаміка пучка при прискоренні в постійному електричному полі, дія просторового заряду.
3. Лінійні прискорювачі. Особливості прискорювачів електронів, протонів і важких іонів.
4. Динаміка частинок в лінійних прискорювачах.

5. Високочастотне фокусування. Фазозмінне фокусування.
6. Циклічні прискорювачі.
7. Фазовий рух частинок, повздовжній фазовий об'єм пучку. Адіабатичне загасання фазових коливань.
8. Методи генерації прискорювального електромагнітного поля: згустками електронів, плазовими коливаннями, електронними пучками, які рухаються.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Прискорювачі прямої дії.
2. Імпульсне прискорення іонів в вакуумних діодах з магнітною ізоляцією; пінч-діоди.
3. Прискорення частинок у вихровому електричному полі. Бетатрон.
4. . Інжекція частинок в лінійний прискорювач.
5. Особливості транспортування частинок в лінійних прискорювачах, вплив просторового заряду та випромінювання пучка.
6. Квадрупольне високочастотне фокусування.

Література:

Основна: [5,7]

Практичне заняття 3. Тема 7. Електронні та іонні пучки та їх використання.

Контрольні питання:

1. Взаємодія іонних та електронних пучків з речовиною
2. Механізми проникнення в речовину, ефективність перетворення кінетичної енергії пучку на тепло.
3. Кінетика теплових процесів у зоні взаємодії пучків з речовиною.
4. Магнетрони.
5. Отримання матеріалів з заданими властивостями

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Використання іонних та електронних пучків для обробки матеріалу
2. Модифікація властивостей речовини, обробка речовини.
3. Імплантація, внесення дефектів .
4. Іонне розпилення, вакуумне-дугове випаровування

Література:

Основна: [3,6]

Додаткова: [3]

Практичне заняття 4. Тема 8. Математичне моделювання пучків заряджених частинок

Контрольні питання:

1. Математичні моделі пучків.
2. Ламінарні пучки і гідродинамічне наближення.

3. Неламінарні пучки без зіткнень.
4. Пучки із зіткненням і дисипацією.
5. Метод великих частинок.
6. Методи розв'язування рівнянь Пуассону і Максвелла
7. РС-код як метод дослідження..

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Опис взаємодії частинок і полів,
2. Закон Чайльда-Ленгмюра.
3. Біполярний вакуумний діод
4. Транспортування пучку заряджених частинок .
5. Моделювання нестационарного та стаціонарного плазмового катоду

Література:

Основна: [1,4]

Додаткова: [2]

Практичне заняття 5. Тема 11. Лінійні прискорювачі.

Контрольні питання:

1. Принцип багаторазового прискорення.
2. Теорія прискорення заряджених іонів в лінійних прискорювачах.
3. Лінійні прискорювачі електронів.
4. Лінійні прискорювачі протонів та іонів.
5. Іонні джерела.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Гранична енергія електронів в лінійному прискорювачі.
2. Особливості конструкції і основні параметри машин для прикладних застосувань.
3. Особливості резонаторів і прискорювальних структур для іонів
4. Протонний лінійний прискорювач відбору для оптичних процесів.

Література:

Основна: [1,2,7]

Додаткова: [1]

Практичне заняття 6. Тема 12. Оптика пучків заряджених частинок

Контрольні питання:

1. Теорія руху заряджених частинок в магнітному полі.
2. Магнітні лінзи.
3. Фокусна відстань лінзи.
4. Жорстке фокусування.
5. Магнітні лінзи з азимутальним полем: параболічні, плазмові лінзи.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Чотириполюсні магніти.
2. Поворотні магніти, їх фокусуєчі властивості.

3. Градієнтне и краєві фокусування.

Література:

Основна: [1,2,7]

Додаткова: [1]

Практичне заняття 7. Тема 15. Зустрічні пучки.

Контрольні питання:

1. Лабораторна система відліку и система відліку центра мас..
2. Закони збереження для частинок які зіштовхуються. Релятивістська інваріантність.
3. Енергія зустрічних пучків.
4. Основні характеристики метода: енергія реакції, світність.
5. Накопичення заряджених частинок.
6. Циклічні і лінійні пучки.
7. Взаємодія пучка с остаточноим газом і зустрічним пучком.
8. Час життя пучка в накопичувачі.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Методи конверсії, багатократне накопичення в заданий фазовий об'єм, охолодження.
2. Обмеження світності установки з зустрічними пучками.
3. Ефекти зустрічі.
4. Протонні накопичувальні кільця.
5. Вакуумна техніка.
6. Радіочастотні прискорювальні резонатори.

Література:

Основна: [1, 2]

Додаткова: [1, 3]

Практичне заняття 8. Тема 16. Проходження пучків через речовину, взаємодія з поверхню, прикладні застосування

Контрольні питання:

1. Довжина вільного пробігу.
2. Рух важких заряджених частинок в речовині.
3. Фотоелектричний ефект. Ефект Комптона. Народження електрон-позитронних пар.
4. Кулонівське розсіювання.
5. Втрати енергії електронів в речовині.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Застосування прискорювачів в медицині.
2. Отримання короткоживучих радіоізотопів для радіофармпрепаратів
3. Застосування прискорювачів у промисловості: дефектоскопія, стерилізація, огляд вантажів та багажу.

4. Розпізнання типу молекулярних середовищ по спектрам електронно-збудженої люмінесценції.
5. Люмінесцентне випромінювання конденсованих середовищ, збуджене електронним пучком.

Література:

Основна: [1, 2]

Додаткова: [1, 3]

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	Загальне визначення пучка частинок. Фазовий простір та поняття ансамблю частинок в застосуванні до опису пучків. Рівняння руху заряджених частинок в електромагнітних полях. Система рівнянь Максвелла. Власні поля пучків. Самоузгоджене поле. Рівняння Власова. Просторова дисперсія в плазмі. Діелектрична проникність плазми без зіткнень. Поздовжні плазмові хвилі. Іонно-звукові хвилі.	3-5	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

2	Електрона емісія: термoeмісія, автоемісія, плазмова емісія, фотоемісія. Електроні гармати. Формування пучків. Типи електронних гармат. Іонні джерела. Механізми генерації позитивних, негативних, поляризованих іонів. Типи іонних джерел	3-5	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
3	Транспортування пучків в повздовжньому магнітному поле. Теорема Буша. Магнітні і електростатичні лінзи з повздовжніми і поперечними полями. Фокусна відстань лінзи. Матричний аналіз руху частинок в каналі. Опис пучків в фазовому просторі. Рівняння моментів і огинаючих пучків. Абераційні ефекти.	1-3; Д1	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
4	Передача енергії між електронами і іонами. Довжина пробігу частинок в плазмі. Взаємодія через плазмові хвилі. Поглинання в плазмі в високочастотних межах. Квазілінійна теорія загасання Ландау. Кінетичне рівняння для релятивістської плазми. Флуктуації в плазмі. Методи витягу прискорених пучків з циклічного прискорювача. Вихід вторинних частинок. Методи сепарації заряджених частинок по масі.	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

5	Прискорення в статичних і квазістатичних електричних полях Динаміка пучка при прискорені в постійному електричному полі, дія просторового заряду. Лінійні прискорювачі. Особливості прискорювачів електронів, протонів і важких іонів. Динаміка частинок в лінійних прискорювачах. Фазовий рух частинок, повздовжній фазовий об'єм пучку. Адіабатичне загасання фазових коливань. Методи генерації прискорювального електромагнітного поля.	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
6	Пучок заряджених частинок в вакуумі. Віртуальний катод; граничний струм. Бріллюєнівський потік. Транспортування інтенсивних пучків в газі та плазмі. Зворотній струм. Нестійкості пучків. Колективні страти енергії пучку в плазмі. Компенсація просторового заряду і струму електронного пучка. Просторовий заряд пучка в циклічних прискорювачах. Кулонівський здвиг частот поперечних коливань. Взаємодія інтенсивних пучків зі структурою каналу транспортування і прискорювальною системою. Внутрішньо-пучкове розсіяне.	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

7	Взаємодія іонних та електронних пучків з речовиною Механізми проникнення в речовину, перетворення кінетичної енергії пучку на тепло. Кінетика теплових процесів у зоні взаємодії пучків з речовиною. Магнетрони. Отримання матеріалів з заданими властивостями Використання іонних та електронних пучків для обробки матеріалу Іонне розпилення, вакуумне-дугове випаровування	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
8	Математичні моделі пучків. Ламінарні пучки і гідродинамічне наближення. Неламінарні пучки без зіткнень. Пучки із зіткненням і дисипацією. Метод великих частинок. Методи розв'язування рівнянь Пуассону і Максвелла РІС-код як метод дослідження.. Опис взаємодії частинок. Транспортування пучку заряджених частинок .	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..
9	Прискорювачі прямої дії. Робочий діапазон прискорювачів прямої дії, їх параметри. Лінійні прискорювачі. Загальні характеристики принципу їх дії і конструкції, переваги і недоліки. Індукційні прискорювачі. Бетатрон. Лінійний бетатрон. Особливості конструкції, параметри. Магнітні системи циклічних прискорювачів. Вакуумні системи прискорювачів. Системи інжекції і витягу пучка.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..

10	Схема конструкції електростатичного генератора. Теорія процесу прискорення заряджених частинок в електростатичному генераторі. Режими роботи. Максимально досяжна енергія заряджених частинок. Аналізуючи магніти. Джерела заряджених іонів. Мішені.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
11	Принцип багаторазового прискорення. Теорія прискорення заряджених іонів в лінійних прискорювачах. Лінійні прискорювачі протонів та іонів. Іонні джерела. Лінійні прискорювачі електронів Гранична енергія електронів в лінійному прискорювачі. Протонний лінійний прискорювач відбору для оптичних процесів		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..
12	Теорія руху заряджених частинок в магнітному полі. Магнітні лінзи. Фокусна відстань лінзи. Жорстке фокусування. Магнітні лінзи з азимутальним полем: параболічні, плазмові лінзи. Чотириполюсні магніти. Поворотні магніти, їх фокусуючі властивості. Гradientне и краєві фокусування.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

13	Методи ідентифікації частинок. Імпульсні іонізаційні і пропорціональні камери, дрейфові камери, сцинтиляційні лічильники. Методи виміру енергії. Основні вимоги до трекових детекторів і калориметрів. Вимір струму пучка. Імпульсні пучки. Неперервні пучки. Вимір магнітного поля пучка. Вимір емітансу пучка. Контроль профілю пучка. Контроль параметрів електронних, позитронних пучків в накопичувачах.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
14	Прискорювач з круговою траєкторією пучків - циклотрон. Принципіальна схема синхротрона. Залежність енергії зарядженої прискореної частинки від параметрів прискорювача. 2. Синхротроне випромінювання и радіаційне тертя. Основні характеристики синхротронного випромінювання, його використання. Рух частинок в прискорюваче в присутності синхротронного випромінювання Декремент загасання коливань частинок. Усталений розмір пучка. Іонізаційне тертя. Електронне охолодження.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

15	Лабораторна система відліку і система відліку центра мас. Закони збереження для частинок які зіштовхуються. Релятивістська інваріантність. Енергія зустрічних пучків. Накопичення заряджених частинок. Циклічні і лінійні пучки. Взаємодія пучка с остаточноим газом і зустрічним пучком. Час життя пучка в накопичувачі. Ефекти зустрічі.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
16	Довжина вільного пробігу. Рух важких заряджених частинок в речовині. Втрати енергії електронів в речовині Фотоелектричний ефект. Ефект Комптона. Народження електрон-позитронних пар. Кулонівське розсіювання. Люмінесцентне випромінювання конденсованих середовищ, збуджене електронним пучком. Застосування прискорювачів в медицині та промисловості.		Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

ОБСЯГ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Підготовка до поточних практичних занять	20
2.	Виконання поточних практичних завдань	20
3.	Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури	40
4.	Індивідуальні консультації з викладачем	10
	ВСЬОГО	90

Завдання (задачі, вправи) для самостійної роботи

1. Кінетична енергія електрона 10 ГеВ. Чому дорівнює імпульс?
2. Знайти радіус обертання електрону з енергією 10 МеВ в полі 2 Т.
3. Знайти швидкість електрону, який не відхилився в схрещених електричному і магнітному полях, якщо $E_{\perp}=10$ кВ/см, $B_{\perp}=30$ мТл.
4. Електронний пучок з електронної гармати має кутовий отвір менший за 1. Електрони рухаються в однорідному магнітному полі, паралельному їх середньої швидкості і поступають на люмінесцентний екран. При якому значенні магнітного поля а екрані буде спостерігатися світлова пляма мінімального розміру (відбудеться фокусування)? Енергія електронів 10 кеВ, розстань від аноду гармати до екрану 30 см.
Вказівка: Використовувати гаусові і атомні одиниці.
5. В експерименті Резерфорду альфа-частинки з енергією 5 МеВ розсіювалися на атомах золота ^{197}Au . Що би спостерігав Резерфорд, як щоб атом був побудовано відповідно до моделі Дж.Томсона (тобто електрони і протони рівномірно розподілені по об'єму атому).?
6. В опиті Міллекена використовуються краплі олії радіусу $a=3$ мкм. Оцініть точність з якою треба вимірювати швидкість падіння крапель, щоб помітити зміну заряду краплі на один електрон, якщо $E=3$ кВ/см, $K=6\pi \cdot \text{в'язкість} \cdot a$, в'язкість повітря $=1,8 \times 10^{-4}$ г/см, густина олії 0.9 г/см³
7. Чому дорівнює струм на виході з синхротрону при тривалості течії 10 сек.?
8. Розв'язати задачу з відповідної тематики з задачника [Д2].

Теми для рефератів та доповідей

1. Математичне моделювання транспортування пучку заряджених частинок.
2. Чисельні методи розрахунку електромагнітних полів.
3. Фокусування магнітним полем.
4. Рівняння руху частинки в магнітному полі прискорювача.
5. Рух зарядженої частинки в електромагнітному полі
6. Рух зарядженої частинки в аксіально-симетричних полях.
7. Класифікація прискорювачів
8. Лінійні прискорювачі
9. Циклічні прискорювачі
10. Прискорювачі на зустрічних пучках
11. Великий адроний коллайдер
12. Синхротронне випромінювання
13. Замкнутий розв'язок рівняння руху. Зв'язок бетатронової функції з матричними елементами.

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, колоквіуму 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. Основні поняття і теореми в фізиці пучків заряджених частинок.
2. Фазовий простір і поняття ансамбля частинок застосоване до опису пучків.
3. Теорема Лиувилля. Адіабатичні інваріанти.
4. Власні поля пучків. Рівняння Власова.
5. Види електронної емісії.
6. Джерела електронних, протонних і іонних пучків.

7. Методи і пристрої фокусування пучків заряджених частинок.
 8. Методи і пристрої для виміру траєкторії пучків.
 9. Засоби транспортування пучків заряджених частинок.
 10. Методи і засоби дослідження характеристик пучків заряджених частинок.
 11. Особливості отримання і транспортування сильнострумових пучків.
 12. Математичні моделі пучків.
 13. Метод великих частинок.
 14. Методи розв'язку рівнянь Пуассону і Максвелла.
 15. Рівняння руху частинки в магнітному полі прискорювача.
 16. Магнітні і електростатичні лінзи. Фокусна відстань. Матриця перетворення пучка.
 17. Фокусування магнітним полем.
 18. Слабке і сильне фокусування.
 19. Прискорювачі прямої дії.
 20. Лінійні прискорювачі.
 21. Індукційний метод прискорювання.
 22. Циклічні прискорювачі.
 23. Прискорювальні резонатори.
 24. Електронне охолодження пучків.
 25. Вплив просторового заряду зустрічного пучку.
 26. Прискорювачі з зустрічними пучками: обмеження світлості ефектами зустрічі.
 27. Особливості прискорювачів різних типів.
 28. Основні характеристики синхротронного випромінювання та його використання.
 29. Електронні накопичувачі як фотонні фабрики.
 30. Лазери на вільних електронах: принцип дії, основні вузли установок.
 31. Вакуумні системи сучасних прискорювачів. Отримання і вимір надвисокого вакууму.
 32. Великі адрони коллайдери.
 33. Технологічні аспекти застосування прискорювачів заряджених частинок.
 34. Застосування прискорювачів в медицині.
 35. Радіаційна безпека при роботі на прискорювачах заряджених частинок
 36. Діючі і проєктовані великі прискорювальні комплекси. Їх основні характеристики.
- .

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 нараховується 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 задачі</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			D (задовільно)
60 – 65	3 (задовільно)		E (достатньо)
30 – 59	2 (незадовільно)	Не зараховано	FX (незадовільно – з можливістю повторного складання)
1 – 29			F (незадовільно – з обов’язковим повторним курсом)