

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор навчально-наукового інституту

«Фізико-технічний факультет»

(вказати назву структурного підрозділу)

Кузнєцов П.І. Б. (вказати П.І.Б. керівника)

(вказати П.І.Б. керівника)

“ 15 лютого 2023 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
Теоретична фізика (Електродинаміка)

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти	1 рівень (бакалаврський)
галузь знань	10 «Природничі науки»
спеціальність	105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
освітня програма	Прикладна фізика
спеціалізація	
вид дисципліни	обов'язкова
факультет	ННІ «Фізико-технічний факультет»

2023/2024 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою Навчально наукового інституту «Фізико-технічний факультет»

“25” серпня 2023 року, протокол № 8

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)
Сергій ТРОФИМЕНКО доктор фізико-математичних наук, старший дослідник, професор кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера,

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера
Протокол від “16” червня 2023 року № 10

Завідувач кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера

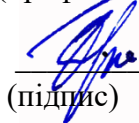


_____ (підпис)

Микола ШУЛЬГА
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми Прикладна фізика
(назва освітньої програми)

Гарант освітньої (професійної) програми



_____ (підпис)

Ігор ГІРКА
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-методичною комісією ННІ «Фізико-технічний факультет»
(назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна)

Протокол від “14” серпня 2023 року № 11

Голова науково-методичної комісії ННІ «Фізико-технічний факультет»



_____ (підпис)

Микола ЮНАКОВ
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програму навчальної дисципліни “Електродинаміка” складено відповідно до освітньо-професійної програми підготовки першого рівня вищої освіти (бакалавр). Галузь знань: 10 – “Природничі науки”. Спеціальність: 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”. Освітня програма: «Прикладна фізика», «Медична фізика», «Біомедичні нанотехнології». При розробці Програми враховані вимоги Стандарту вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, галузі знань 10 – «Природничі науки», спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», затвердженого наказом МОН України № 804 від 16.06.2020 р.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Полягає в оволодінні студентами основними поняттями та методами розв’язування задач у галузі спеціальної теорії відносності, класичної електродинаміки у вакуумі та електродинаміки суцільних середовищ.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основними завданнями є засвоєння студентами базових понять, позначень, математичного апарату та методів спеціальної теорії відносності та електродинаміки з метою їх подальшого використання в інших навчальних курсах, як-от квантовій електродинаміці, фізиці плазми, ядерній фізиці, фізиці твердого тіла тощо, та в науковій роботі. Зокрема це стосується таких понять як перетворення Лоренца для різноманітних фізичних величин, псевдоевклідовий простір, чотиривимірні вектори і тензори, коваріантна форма запису фізичних законів, функція Лагранжа для системи заряджених частинок в електромагнітному полі, рівняння Максвелла та рівняння руху релятивістської частинки в електромагнітному полі, принцип калібрувальної інваріантності, дипольний момент та тензор квадрупольного моменту системи зарядів, магнітний момент системи зарядів, загаяні потенціали, інтенсивність та спектрально-кутова густина випромінювання, переріз розсіювання випромінювання вільними частинками та осциляторами, вектори поляризації та намагнічування, тензори діелектричної та магнітної проникності, макроскопічні рівняння Максвелла у формах, що використовуються при низьких та високих частотах зміни електромагнітного поля, вектор Пойнтінга у речовині, ємність провідників, квазістаціонарне наближення, скін-ефект, матриця імпедансу, комплексна діелектрична проникність, часова та просторова дисперсія, дисперсійні співвідношення, випромінювання Вавілова-Черенкова, поляризаційні втрати енергії, перехідне випромінювання, ТЕ- та ТМ-хвилі у хвилеводі тощо, а також методів розв’язку зазначених рівнянь, методів теоретичного розгляду зазначених явищ та способів обчислення згаданих вище величин.

Загальні компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення дисципліни «Теоретична фізика (Електродинаміка)»:

- Здатність до проведення досліджень на відповідному рівні. (ЗК-6)
- Здатність працювати автономно. (ЗК-9)

Фахові компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення дисципліни «Теоретична фізика (Електродинаміка)»:

- Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем. (СК-6)
- Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності. (СК-7)

1.3. Кількість кредитів

9

1.4 Загальна кількість годин

270

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Обов'язкова	
Денна форма навчання	
Рік підготовки	
3-й	3-й
Семестр	
5-й	6-й
Лекції	
48 год.	48 год.
Практичні, семінарські заняття	
32 год.	32 год.
Лабораторні заняття	
0 год.	0 год.
Самостійна робота	
70 год.	40 год.
Індивідуальні завдання	
5	

1.6. Заплановані результати навчання:

знати:

- постулати та основні поняття спеціальної теорії відносності;
- визначення та властивості 4-векторів і 4-тензорів;

- перетворення Лоренца для компонент довільного 4-вектору;
- релятивістські визначення енергії та імпульсу частинки;
- явний вигляд 4-векторів координати, швидкості, імпульсу, потенціалу, визначення тензору електромагнітного поля;
- комбінації фізичних величин (час, координати, енергія, імпульс, електричне і магнітне поле), інваріантні відносно перетворень Лоренца;
- рівняння Максвелла та рівняння руху релятивістської частинки у тривимірному та чотиривимірному вигляді;
- принцип калібрувальної інваріантності, калібрування Кулона та Лоренца;
- визначення дипольного моменту, тензору квадрупольного моменту та магнітного моменту системи зарядів;
- визначення густини енергії та потоку енергії електромагнітного поля;
- комплексна форма запису поля плоскої монохроматичної хвилі з лінійною та круговою поляризацією;
- умови застосовності класичної електродинаміки;
- умови застосовності дипольного наближення у теорії випромінювання;
- основні властивості синхротронного випромінювання.
- макроскопічні рівняння Максвелла у формах, що використовуються при низьких та високих частотах зміни електромагнітного поля;
- визначення векторів поляризації та намагнічування, електричної індукції та магнітного поля;
- граничні умови для електричного, магнітного поля та густини постійного струму;
- визначення вектора Пойнтінга та густини енергії електромагнітного поля у речовині за відсутності дисперсії;
- основні механізми поляризації та намагнічування речовини;
- закони Кірхгофа;
- визначення коефіцієнтів самоіндукції та взаємної індукції провідників;
- умови застосування квазістаціонарного наближення;
- сутність явищ часової і просторової дисперсії та їх фізичні причини;
- характер залежності показника заломлення та коефіцієнту поглинання речовини від частоти у моделі гармонійних осциляторів;
- асимптотичний вигляд діелектричної проникності речовини при високих частотах;
- рівняння, що визначають дисперсійні співвідношення для поздовжніх і поперечних хвиль в ізотропному середовищі;
- основні властивості випромінювання Вавілова-Черенкова і перехідного випромінювання та фізичні причини їх виникнення;
- типи та фізичні властивості хвиль, що можуть розповсюджуватися в однозв'язному хвилеводі.

вміти:

- виконувати операції з 4-векторами і 4-тензорами;
- записувати рівняння руху частинки у декартовій та циліндричній системі координат у довільному електромагнітному полі;
- виконувати перетворення Лоренца для часу, координат, довжин, швидкості, імпульсу, енергії, електричного та магнітного поля, кутового розподілу, спектрально-кутової густини та частоти випромінювання;
- описувати кінематику зіткнень релятивістських частинок на основі закону збереження 4-імпульсу;
- розв'язувати рівняння руху релятивістської частинки в тривимірному та чотиривимірному вигляді в однорідних електричних і магнітних полях, а також у суперпозиції цих полів;
- обчислювати потенціал системи зарядів у дипольному та квадрупольному наближенні та потенційну енергію диполя і квадруполь у зовнішньому електричному полі;
- розраховувати повну інтенсивність та спектрально-кутові характеристики випромінювання частинки із заданим законом руху;

- розраховувати переріз розсіювання випромінювання вільними частинками та осциляторами.
- обчислювати електростатичні поля зарядів у діелектрику поблизу поверхонь провідників шляхом розв'язування рівнянь Максвелла з граничними умовами (зокрема рівняння Лапласа у сферичних координатах), з використанням рівнянь Максвелла в інтегральній формі та за допомогою методу зображень;
- знаходити сили, що діють на поверхню провідника і на діелектрик у зовнішньому електричному полі;
- знаходити силу, що діє на магнетик у зовнішньому магнітному полі;
- обчислювати потенційну енергію взаємодії системи зарядів і заряджених провідників;
- розраховувати ємність ізольованих провідників і конденсаторів різної форми;
- обчислювати супротив масивних провідників та кількість тепла, що виділяється при проходженні крізь них постійного струму;
- знаходити магнітні поля постійних струмів шляхом розв'язування рівнянь Максвелла з граничними умовами, за допомогою рівнянь Максвелла в інтегральній формі та на основі закону Біо-Савара-Лапласа;
- оцінювати коефіцієнт самоіндукції провідників;
- обчислювати змінні магнітні та електричні поля всередині масивних провідників у квазістаціонарному наближенні;
- описувати гармонійні коливання змінного струму в лінійних провідниках у квазістаціонарному наближенні та знаходити власні частоти таких коливань;
- описувати процеси розповсюдження електромагнітних хвиль в однорідній речовині за відсутності та за наявності часової і просторової дисперсії;
- оцінювати діелектричну проникність, показник заломлення та коефіцієнт поглинання речовини у моделі гармонійних осциляторів;
- знаходити закони дисперсії поздовжніх і поперечних хвиль та обчислювати фазову і групову швидкість цих хвиль;
- обчислювати дисипацію енергії хвилі та густину електромагнітної енергії речовини за наявності часової дисперсії;
- розраховувати втрати енергії швидкої зарядженої частинки на черенковське випромінювання та генерування поздовжніх коливань у речовині.

студенти мають досягти таких результатів навчання:

- Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики. **(Зн-1)**
- Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, механіки суцільних середовищ, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та геометричної оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з теоретичної та прикладної фізики. **(Зн-4)**
- Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій. **(Зн-5)**
- Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів. **(Ум-1)**
- Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій. **(Ум-3)**
- Вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики. **(Ум-4)**

- Відшукувати необхідну науково-технічну інформацію в науковій літературі, електронних базах, інших джерелах, оцінювати надійність та релевантність інформації. (Ум-5)
- Класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну інформацію в галузі прикладної фізики. (Ум-6)
- Мати базові навички проведення теоретичних та/або експериментальних наукових досліджень з окремих спеціальних розділів фізики, що виконуються індивідуально (автономно) та/або у складі наукової групи. (АіВ-1)

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Частина I (1-й семестр)

Розділ 1. Основи спеціальної теорії відносності.

Тема 1. Експеримент Майкельсона. Принципи відносності Галілея та Ейнштейна. Постулати теорії відносності. Лоренцеве перетворення координат і часу.

Тема 2. Наслідки перетворень Лоренца. Релятивістське скорочення довжини та сповільнення часу. Перетворення швидкості та аберація світла.

Тема 3. Інтервал. Перетворення Лоренца як чотиривимірний поворот. Простір Мінковського.

Тема 4. Чотиривимірні вектори і тензори та їх лоренцеве перетворення. Операції з чотиривимірними векторами і тензорами. Метричний тензор. Абсолютно антисиметричний чотиривимірний одиничний тензор четвертого рангу.

Розділ 2. Релятивістська механіка

Тема 5. Чотиривимірна швидкість. Дія для вільної частинки. Функція Лагранжа, енергія і імпульс вільної частинки, маса спокою. Перетворення Лоренца для енергії і імпульсу. Перехід до граничного випадку нерелятивістської механіки.

Тема 6. Закони збереження в релятивістській механіці. Закон збереження 4-вектора імпульсу. Центр інерції системи частинок. Розпад частинки. Дефект мас. Пружні зіткнення двох частинок.

Розділ 3. Заряджена частинка в електромагнітному полі

Тема 7. 4-вектор потенціалу електромагнітного поля. Дія, функція Лагранжа та функція Гамільтона частинки в електромагнітному полі. Рівняння руху частинки в електромагнітному полі у тривимірній формі. Принцип калібрувальної інваріантності. Постійне електромагнітне поле. Однорідне електричне поле. Однорідне магнітне поле.

Тема 8. Рух частинки у постійному електричному полі. Рух частинки у постійному магнітному полі. Дрейф частинки у схрещених постійних однорідних електричному і магнітному полях.

Тема 9. Рівняння руху частинки в електромагнітному полі у чотиривимірній формі. Тензор електромагнітного поля. Перетворення Лоренца для електричного і магнітного полів. Інваріанти електромагнітного поля.

Розділ 4. Рівняння Максвелла

Тема 10. Перша пара рівнянь Максвелла у тривимірній та чотиривимірній формі. Чотиривимірний вектор густини струму. Дельта-функція. Рівняння неперервності.

Тема 11. Опис поля в рамках формалізму Лагранжа. Дія для електромагнітного поля. Друга пара рівнянь Максвелла у чотиривимірній та тривимірній формі. Струм зсуву.

Тема 12. Рівняння Максвелла для потенціалів. Калібрування Лоренца та Кулона. Густина та потік енергії електромагнітного поля. Імпульс електромагнітного поля.

Розділ 5. Постійне електромагнітне поле.

Тема 13. Електростатичне поле. Електростатична енергія системи зарядів. Класичний радіус електрона.

Тема 14. Електричне поле на великій відстані від системи зарядів. Дипольний момент. Тензор квадрупольного моменту. Система зарядів у зовнішньому електричному полі. Потенційна енергія взаємодії диполя і квадруполя з зовнішнім сталим електричним полем.

Тема 15. Усереднене за часом магнітне поле. Закон Біо і Савара. Магнітне поле на великих відстанях від системи зарядів, які фінітно рухаються. Магнітний момент системи зарядів.

Тема 16. Момент сил, що діє на систему зарядів у зовнішньому магнітному полі. Прецесія магнітного моменту у зовнішньому магнітному полі. Частота Лармора. Функція Лагранжа системи зарядів у зовнішньому постійному і однорідному магнітному полі.

Розділ 6. Електромагнітні хвилі.

Тема 17. Хвильове рівняння у тривимірному і чотиривимірному вигляді. Плоскі хвилі. Зв'язок між напруженостями електричного і магнітного полів плоскої хвилі. Густина і потік енергії плоскої хвилі. Монохроматична плоска хвиля. Поляризація.

Тема 18. Середня густина і потік енергії у монохроматичній плоскій хвилі. Релятивістський ефект Доплера. Спектральний розклад поля, яке змінюється з часом періодично та неперіодично.

Розділ 7. Випромінювання електромагнітних хвиль.

Тема 19. Загаєні потенціали. Поле на великих відстанях від системи зарядів, що рухаються довільним чином. Хвильова зона. Довжина формування випромінювання.

Тема 20. Дипольне випромінювання. Умови застосування дипольного наближення. Електричне и магнітне поле випромінювання. Диференційна та повна інтенсивність випромінювання. Квадрупольне та магнітно-дипольне випромінювання.

Тема 21. Спектрально-кутова густина випромінювання (формула через швидкість). Випромінювання при миттєвому старті частинки. Фізичні причини випромінювання. Спектрально-кутова густина випромінювання (формула через прискорення).

Тема 22. Втрати енергії релятивістської частинки на випромінювання. Випромінювання при періодичному русі нерелятивістської частинки. Кутовий розподіл випромінювання релятивістської частинки. Синхротронне (магніто-гальмівне) випромінювання. Ондуляторне випромінювання.

Тема 23. Гальмування частинок за рахунок випромінювання. Сила променистого тертя. Умови застосування класичної теорії випромінювання. Розсіювання електромагнітних хвиль вільним зарядом. Формула Томсона. Розсіювання електромагнітних хвиль осцилятором. Природна ширина спектральної лінії.

Частина II (2-й семестр)

Розділ 8. Рівняння Максвелла для електромагнітного поля в суцільних середовищах.

Електростатика. Поляризація та намагнічування речовини

Тема 24. Побудова макроскопічних рівнянь для електромагнітного поля в речовині шляхом усереднення мікроскопічних рівнянь Максвелла. Вектори поляризації, намагнічування, електричної індукції та магнітного поля. Вільні та зв'язані заряди. Поляризаційний струм та струм намагнічування. Граничні умови для електромагнітного поля. Закон збереження енергії для системи частинок і електромагнітного поля у речовині.

Тема 25. Електростатика. Основна задача електростатики за наявності діелектриків та провідників. Теорема єдиності розв'язку електростатичної задачі. Поле зарядженої площини. Сила, що діє на поверхню зарядженого провідника. Сила, що діє на діелектрик у зовнішньому електричному полі.

Тема 26. Енергія електростатичного поля заряджених провідників. Ємність провідників і конденсаторів.

Тема 27. Метод зображень. Поле точкового заряду у діелектрику поблизу плоскої поверхні провідника. Поле точкового заряду у діелектрику поблизу плоскої поверхні іншого діелектрика. Діелектрична та провідна куля у зовнішньому однорідному електричному полі.

Тема 28. Механізми поляризації полярних і неполярних діелектриків. Класична теорія діамagnetизму та парамагнетизму. Вплив квантових ефектів на намагнічування парамагнетиків. Класична феноменологічна теорія феромагнетизму.

Розділ 9. Постійний струм. Магнітне поле постійного струму

Тема 29. Постійний електричний струм. Узагальнений закон Ома та закон Джоуля-Ленца у диференціальній формі. Граничні умови для вектора густини струму. Лінійні провідники з постійним струмом. Перший та другий закони Кірхгофа для розгалужених ланцюгів зі струмом. Закон Ома та закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі.

Тема 30. Струм у масивних провідниках. Аналогія між рівняннями для струму у масивних провідниках та рівняннями електростатики. Розрахунок опору масивного провідника. Ефект Холла.

Тема 31. Магнітне поле постійного струму. Рівняння та крайові умови для векторного потенціалу. Магнітне поле постійних об'ємних та лінійних струмів. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле на осі кільця зі струмом.

Тема 32. Енергія магнітного поля постійних струмів. Коефіцієнти самоіндукції та взаємної індукції провідників. Самоіндукція лінійного провідника та соленоїда.

Тема 33. Магнітний момент постійного струму. Сила, що діє на магнетик у зовнішньому магнітному полі.

Розділ 10. Квазістаціонарні явища

Тема 34. Умови застосування квазістаціонарного наближення. Рівняння Максвелла у квазістаціонарному наближенні. Окремі рівняння для магнітного та електричного поля та відповідні граничні умови. Спадання магнітного поля у провідній пластинці при миттєвому вимкненні джерела струму.

Тема 35. Скін-ефект. Проникнення змінного магнітного поля всередину масивного провідника. Виділення тепла у масивному провіднику, що перебуває у змінному зовнішньому магнітному полі.

Тема 36. Квазістаціонарні струми в лінійних провідниках. Випадок окремого контуру з активним опором та індуктивністю. Випадок декількох індуктивно зв'язаних контурів. Випадок контуру з активним опором, індуктивністю та ємністю. Матриця імпедансу. Закони Кірхгофа для контуру з розгалуженнями, у якому струм змінюється за гармонійним законом.

Тема 37. Електромагнітні хвилі в діелектриках за відсутності дисперсії. Загальні рівняння. Плоскі хвилі. Плоскі монохроматичні хвилі. Комплексний хвильовий вектор. Зв'язок між електричним і магнітним полем хвилі. Густина та потік енергії хвилі.

Тема 38. Електромагнітні хвилі у провідниках за відсутності дисперсії провідності. Діелектрична проникність провідника, що залежить від частоти. Комплексний хвильовий вектор плоскої монохроматичної хвилі у провіднику. Показник заломлення та коефіцієнт поглинання. Зв'язок між електричним і магнітним полем хвилі. Перехід до граничних випадків, що відповідають діелектрику та ідеальному провіднику.

Тема 39. Падіння електромагнітної хвилі на межу поділу вакуум-провідник та її проникнення всередину провідника. Скін-шар. Гранична умова Леонтовича. Поверхневий імпеданс металів.

Тема 40. Електромагнітні хвилі у хвилеводах. Рівняння та граничні умови при поширенні електромагнітних хвиль у металевій трубі постійного перерізу. Неможливість поширення поперечної хвилі в однозв'язному хвилеводі. ТЕ- та ТМ-хвилі. Граничні довжини хвиль. Фазова та групова швидкість хвиль у хвилеводі.

Розділ 11. Електромагнітні хвилі в речовині при високих частотах

Тема 41. Макроскопічні рівняння Максвелла при високих частотах. Нове визначення вектора електричної індукції. Оператор діелектричної проникності речовини. Часова та просторова дисперсія.

Тема 42. Дисперсія діелектричної проникності ε у моделі гармонійних осциляторів. Обчислення ε для діелектриків. Масштаб ефектів просторової дисперсії в діелектрику. Плазмова частота. Показник заломлення і коефіцієнт поглинання в моделі гармонійних осциляторів. Нормальна та аномальна дисперсія. Полоси поглинання речовини. Діелектрична проникність при високих частотах.

Тема 43. Обчислення ε для провідників у моделі гармонійних осциляторів. Встановлення відповідності з діелектричною проникністю провідника, що була введена при розгляді квазістаціонарних явищ. Умова відсутності просторової дисперсії у провідному середовищі. Діелектрична проникність холодної плазми.

Тема 44. Електромагнітні хвилі у середовищі з просторовою і часовою дисперсією. Дисперсійні співвідношення у загальному вигляді. Максвеллівський тензор. Тензор діелектричної проникності ізотропного середовища. Дисперсійні співвідношення для поперечних і поздовжніх хвиль.

Тема 45. Дисипація енергії хвилі у середовищі з дисперсією. Густина електромагнітної енергії у середовищі з часовою та просторовою дисперсією.

Розділ 12. Проходження швидких заряджених частинок крізь речовину. Геометрична оптика

Тема 46. Огляд електродинамічних процесів, що мають місце при проходженні швидкої частинки крізь речовину. Випромінювання Вавілова-Черенкова. Умови існування випромінювання. Кутовий та спектральний розподіл випромінювання.

Тема 47. Поляризаційні втрати енергії частинки.

Тема 48. Перехідне випромінювання при проходженні частинкою межі поділу вакуум-ідеальний провідник. Спектрально-кутовий і спектральний розподіл випромінювання у нерелятивістському та ультрарелятивістському випадку.

Тема 49. Геометрична оптика. Рівняння ейконалу при поширенні променя у прозорому середовищі. Принцип Ферма.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
л		п	лаб.	інд.	с. р.	л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Основи спеціальної теорії відносності												
Разом за розділом 1	30	9	6			15	-	-	-	-	-	-
Розділ 2. Релятивістська механіка												
Разом за розділом 2	27	6	6		•	15	-	-	-	-	-	-
Розділ 3. Заряджена частинка в електромагнітному полі												
Разом за розділом 3	37	9	8		•	20	-	-	-	-	-	-
Розділ 4. Рівняння Максвелла												
Разом за розділом 4	15	6	4			5	-	-	-	-	-	-
Розділ 5. Постійне електромагнітне поле												
Разом за розділом 5	15	6	4			5	-	-	-	-	-	-
Розділ 6. Електромагнітні хвилі												
Разом за розділом 6	10	3	2			5	-	-	-	-	-	-
Розділ 7. Випромінювання електромагнітних хвиль.												
Разом за розділом 7	16	9	2			5	-	-	-	-	-	-
Розділ 8. Рівняння Максвелла для електромагнітного поля в суцільних середовищах. Електростатика. Поляризація та намагнічування речовини												
Разом за розділом 1	39	12	12		•	15	-	-	-	-	-	-
Розділ 9. Постійний струм. Магнітне поле постійного струму												
Разом за розділом 2	29	9	10		•	10	-	-	-	-	-	-
Розділ 10. Квазістаціонарні явища												
Разом за розділом 3	24	12	6			6	-	-	-	-	-	-
Розділ 11. Електромагнітні хвилі в речовині при високих частотах												
Разом за розділом 4	16	9	2		•	5	-	-	-	-	-	-
Розділ 12. Проходження швидких заряджених частинок крізь речовину. Геометрична оптика												
Разом за розділом 5	12	6	2			4	-	-	-	-	-	-
Усього годин	270	96	64			110	-	-	-	-	-	-

4. Теми аудиторних практичних занять

Розв'язання задач зі спеціальної теорії відносності та електродинаміки. Номери задач даються зі збірників [5] (*частина I*) і [6] (*частина II*) основного списку літератури.

Частина I (1-й семестр)

Тема 1. Елементи математичного апарату електродинаміки – 2 години.

Задачі 1, 3, 6, 7, 9.

Тема 2. Перетворення Лоренца – 4 години.

Задачі 12, 14, 16, 18, 19.

Тема 3. Векторна форма перетворень Лоренца. Прискорення – 2 години

Задачі 23, 24, 25, 26.

Тема 4. Енергія і імпульс – 2 години

Задачі 30, 31, 32, 33, 34.

Тема 5. Закон збереження енергії-імпульсу – 2 години.

Задачі 38, 40, 41, 44.

Тема 6. Рух заряджених частинок в електромагнітному полі – 8 годин

Задачі 45, 46, 49, 50, 52, 56, 60, 61, 62, 63.

Тема 7. Поле заряду, що рівномірно рухається. Магнітний момент – 4 години

Задачі 66, 68, 71;

Тема 8. Постійне електричне поле у вакуумі – 4 години

Задачі 72, 75, 77.

Тема 9. Перетворення Лоренца для кутового розподілу випромінювання. Ефект Доплера – 2 години.

Задачі 79, 80, 83.

Тема 10. Випромінювання електромагнітних хвиль. Тиск світла – 2 години.

Задачі 85, 86.

Частина II (2-й семестр)

Тема 11. Постійне електричне поле у вакуумі – 2 години.

Задачі 2, 4, 9.

Тема 12. Електростатика провідників і діелектриків – 10 годин.

Задачі 10, 12, 15, 16, 19, 22, 24, 26, 30, 31.

Тема 13. Постійний струм – 4 години

Задачі 34, 37, 39, 41.

Тема 14. Магнітне поле постійного струму – 6 годин

Задачі 42, 43, 50, 53, 54.

Тема 15. Квазістаціонарне електромагнітне поле – 6 годин.

Задачі 55, 56, 60, 62, 66.

Тема 16. Електромагнітні хвилі – 4 години

Задачі 70, 72, 74.

5. Самостійна робота

Завдання для самостійної роботи представляють собою домашні завдання по кожній із тем практичних занять. Номери задач даються зі збірників [5] (*частина I*) і [6] (*частина II*).

Частина I (1-й семестр)

Тема 1. Елементи математичного апарату електродинаміки – 2 години.

Задачі 2, 4, 5, 8, 10.

Тема 2. Перетворення Лоренца – 4 години.

Задачі 11, 13, 15, 17, 20, 21, 22.

Тема 3. Векторна форма перетворень Лоренца. Прискорення – 2 години

Задачі 27, 28, 29.

Тема 4. Енергія і імпульс – 2 години

Задачі 35, 36, 37.

Тема 5. Закон збереження енергії-імпульсу – 2 години.

Задачі 39, 42, 43.

Тема 6. Рух заряджених частинок в електромагнітному полі – 8 годин

Задачі 47, 48, 51, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 64, 65.

Тема 7. Поле заряду, що рівномірно рухається. Магнітний момент – 4 години

Задачі 67, 69, 70;

Тема 8. Постійне електричне поле у вакуумі – 4 години

Задачі 73, 74, 76, 78.

Тема 9. Перетворення Лоренца для кутового розподілу випромінювання. Ефект Доплера – 2 години.

Задачі 81, 82, 84.

Тема 10. Випромінювання електромагнітних хвиль. Тиск світла – 2 години.

Задачі 87, 88.

Частина II (2-й семестр)

Тема 11. Постійне електричне поле у вакуумі – 3 години.

Задачі 1, 3, 5, 6, 7, 8.

Тема 12. Електростатика провідників і діелектриків – 12 годин.

Задачі 11, 13, 14, 17, 18, 20, 21, 23, 25, 27, 28, 32, 33.

Тема 13. Постійний струм – 4 години

Задачі 35, 36, 38, 40.

Тема 14. Магнітне поле постійного струму – 6 годин

Задачі 45, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 52.

Тема 15. Квазістаціонарне електромагнітне поле – 6 годин.

Задачі 57, 58, 59, 61, 63, 64, 65.

Тема 16. Електромагнітні хвилі – 9 годин

Задачі 67, 68, 69, 64, 71, 73.

6. Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання передбачено у вигляді поточних контрольних робіт за розділами 1 і 2 та за розділами 8 і 9, а також у вигляді розв'язування студентами задач 89 – 92 зі збірника [5] з теми «Рух заряду в кулонівському полі та полі електромагнітної хвилі» та задач 75 – 80 зі збірника [6] за темами «Електростатика провідників і діелектриків» та «Електромагнітні хвилі».

7. Методи навчання

Лекційні заняття проводяться методом лекції та розповіді-бесіди. Задаються домашні завдання з розв'язування задач.

8. Методи контролю

Поточний контроль у кожному семестрі складається з:

- 1) активної участі в аудиторних заняттях (ваговий бал – 20);
- 2) виконання домашніх завдань із розв'язування задач (ваговий бал – 15);
- 3) контрольні роботи (ваговий бал – 20);
- 4) Експрес-контроль на практичних заняттях (ваговий бал – 5)

Підсумковий контроль у кожному семестрі проводиться у формі екзамену (ваговий бал – 40). До складання іспиту допускають студентів, які набрали протягом семестру не менше 10 балів.

Екзаменаційне завдання: білет містить два теоретичних питання (ваговий бал – 20) та одну задачу (ваговий бал – 10).

Число балів, які студент отримав на екзамені, є сумою балів, що були отримані за кожне завдання з екзаменаційного білету плюс бали за додаткові запитання (ваговий бал – 10).

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою що наведена нижче.

Для допуску до складання підсумкового контролю (екзамену) здобувач вищої освіти повинен набрати не менше 15 балів з навчальної дисципліни під час поточного контролю, самостійної роботи, індивідуального завдання.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Запитання до екзамену

Частина I (1-й семестр)

1. Принцип відносності Ейнштейна. Постулати теорії відносності. Лоренцеве перетворення координат і часу.
2. Наслідки перетворень Лоренца. Релятивістське скорочення довжини та сповільнення часу.
3. Перетворення Лоренца для швидкості та аберація світла.
4. Інваріанти відносно перетворень Лоренца. Інтервал.
5. Перетворення Лоренца як чотиривимірний поворот. Простір Мінковського.
6. Чотиривимірні вектори і тензори та їх лоренцеве перетворення. Операції з чотиривимірними векторами і тензорами.
7. Дія для вільної частинки. Функція Лагранжа, енергія і імпульс вільної частинки, маса спокою.
8. 4-вектори швидкості та імпульсу. Перетворення Лоренца для енергії і імпульсу.
9. Центр інерції системи частинок. Розпад частинки. Дефект мас.
10. Пружне зіткнення двох частинок.
11. Дія, функція Лагранжа та функція Гамільтона частинки в електромагнітному полі.
12. Рівняння руху частинки в електромагнітному полі у тривимірній формі. Принцип калібрувальної інваріантності.
13. Постійне електромагнітне поле. Скалярний потенціал однорідного електричного поля. Векторний потенціал однорідного магнітного поля.
14. Рух частинки у постійному електричному полі.
15. Рух частинки у постійному магнітному полі.

16. Дрейф частинки у схрещених постійних однорідних електричному і магнітному полях.
17. Рівняння руху частинки в електромагнітному полі у чотиривимірній формі. Тензор електромагнітного поля.
18. Перетворення Лоренца для електричного і магнітного полів. Інваріанти електромагнітного поля.
19. Перша пара рівнянь Максвелла у тривимірній та чотиривимірній формі. Чотиривимірний вектор густини струму. Рівняння неперервності.
20. Дія для електромагнітного поля. Друга пара рівнянь Максвелла у чотиривимірній та тривимірній формі.
21. Рівняння Максвелла для потенціалів. Калібрування Лоренца та Кулона.
22. Закон збереження енергії для системи частинок в електромагнітному полі.
23. Закон збереження імпульсу для системи частинок в електромагнітному полі.
24. Електростатичне поле. Електростатична енергія системи зарядів.
25. Електричне поле на великій відстані від системи зарядів. Дипольний момент. Тензор квадрупольного моменту.
26. Потенційна енергія системи зарядів у зовнішньому електричному полі.
27. Постійне магнітне поле. Закон Біо і Савара. Магнітне поле на великих відстанях від системи зарядів, які фінітно рухаються. Магнітний момент системи зарядів.
28. Момент сил, що діє на систему зарядів у зовнішньому магнітному полі. Прецесія магнітного моменту. Функція Лагранжа системи зарядів у зовнішньому постійному і однорідному магнітному полі.
29. Хвильове рівняння у тривимірному і чотиривимірному вигляді. Плоскі хвилі.
30. Монохроматичні плоскі хвилі. Поляризація.
31. Релятивістський ефект Доплера.
32. Спектральний розклад поля, яке змінюється з часом періодично та неперіодично.
33. Загаяні потенціали. Поле на великих відстанях від системи зарядів, що рухаються довільним чином.
34. Дипольне випромінювання.
35. Довжина формування випромінювання. Спектрально-кутова густина випромінювання (формула через швидкість).
36. Випромінювання при миттєвому старті частинки. Фізичні причини випромінювання.
37. Спектрально-кутова густина випромінювання (формула через прискорення).
38. Втрати енергії релятивістської частинки на випромінювання.
39. Випромінювання при періодичному русі нерелятивістської частинки.

40. Кутовий розподіл випромінювання релятивістської частинки. Синхротронне (магніто-гальмівне) випромінювання. Ондуляторне випромінювання.
41. Гальмування частинок за рахунок випромінювання. Сила променистого тертя. Умови застосування класичної теорії випромінювання.
42. Розсіювання електромагнітних хвиль вільним зарядом.
43. Розсіювання електромагнітних хвиль осцилятором.
44. Природна ширина спектральної лінії.

Частина II (2-й семестр)

45. Макроскопічні рівняння Максвелла для електромагнітного поля в речовині (випадок низьких частот).
46. Граничні умови для електромагнітного поля.
47. Закон збереження енергії для системи частинок і електромагнітного поля у речовині.
48. Основні рівняння електростатики. Граничні умови для електричного поля та потенціалу в електростатиці.
49. Основна задача електростатики. Теорема єдиності розв'язку електростатичної задачі.
50. Поле зарядженої площини. Сила, що діє на поверхню зарядженого провідника.
51. Сила, що діє на діелектрик у зовнішньому електричному полі. Діелектрична пластинка у зовнішньому однорідному електричному полі.
52. Енергія електростатичного поля заряджених провідників.
53. Ємність провідників. Ємність шаруватого плоского і циліндричного конденсаторів.
54. Метод зображень. Поле точкового заряду у діелектрику поблизу плоскої поверхні провідника.
55. Метод зображень. Поле точкового заряду у діелектрику поблизу плоскої поверхні іншого діелектрика.
56. Діелектрична та провідна куля у зовнішньому однорідному електричному полі.
57. Механізми поляризації неполярних та полярних діелектриків.
58. Класична теорія діамагнетизму.
59. Класична теорія парамагнетизму. Вплив квантових ефектів.
60. Класична феноменологічна теорія феромагнетизму.

61. Постійний електричний струм. Закон Ома та закон Джоуля-Ленца у диференційній формі. Рівняння Максвелла та закон збереження заряду при постійному струмі. Узагальнені закон Ома та закон Джоуля-Ленца.
62. Тепло, що виділяється у замкненому провіднику з постійним струмом. Граничні умови для вектора густини струму. Незмінність величини струму вздовж провідника.
63. Лінійні провідники з постійним струмом. Закон Ома для ділянки провідника. Закони Кірхгофа. Закон Ома та закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі.
64. Струм у масивних провідниках. Аналогія з електростатикою. Опір системи з двох сферичних електродів у рідині з поганою провідністю.
65. Ефект Холла.
66. Рівняння для магнітного поля постійного струму. Рівняння та крайові умови для векторного потенціалу у загальному випадку та у випадку протікання струму вздовж однієї осі.
67. Магнітне поле постійних об'ємних та лінійних струмів. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле на осі кільця зі струмом. Магнітне поле при циліндрично симетричному розподілі струму.
68. Енергія магнітного поля постійних струмів. Коефіцієнти самоіндукції та взаємної індукції провідників.
69. Самоіндукція лінійного провідника та соленоїда.
70. Магнітний момент постійного струму. Сила, що діє на магнетик у зовнішньому магнітному полі.
71. Умови застосування квазістаціонарного наближення. Рівняння Максвелла у квазістаціонарному наближенні. Окремі рівняння для магнітного і електричного поля та відповідні граничні умови.
72. Спадання магнітного поля у провідній пластинці при миттєвому вимкненні джерела струму.
73. Квазістаціонарний струм у масивному циліндричному провіднику. Скін-ефект.
74. Циліндричний провідник у зовнішньому магнітному полі, що змінюється за гармонійним законом.
75. Квазістаціонарний струм у лінійному контурі з активним опором та індуктивністю та у системі індуктивно зв'язаних контурів.
76. Квазістаціонарний струм у лінійному контурі з активним опором, індуктивністю, ємністю та ЕРС.

77. Вільні коливання у лінійному контурі з активним опором, індуктивністю та ємністю. Система декількох подібних контурів з індуктивним зв'язком. Закони Кірхгофа при гармонійній залежності струму від часу.
78. Електромагнітні хвилі в діелектриках за відсутності дисперсії.
79. Електромагнітні хвилі у провідниках.
80. Проникнення електромагнітної хвилі всередину провідника. Гранична умова Леонтовича.
81. Електромагнітні хвилі в одозв'язному хвилеводі прямокутного перерізу. Основні рівняння, вирази для компонент полів через E_z та H_z . Неможливість поширення поперечної хвилі у такому хвилеводі.
82. Типи хвиль в одозв'язному хвилеводі прямокутного перерізу, та їх фізичні властивості.
83. Макроскопічні рівняння Максвелла при високих частотах. Часова та просторова дисперсія.
84. Діелектрична проникність, показник заломлення та коефіцієнт поглинання діелектриків у моделі гармонійних осциляторів.
85. Діелектрична проникність провідників у моделі гармонійних осциляторів. Діелектрична проникність холодної плазми.
86. Електромагнітні хвилі у середовищі з просторовою і часовою дисперсією. Дисперсійні співвідношення у загальному вигляді. Максвеллівський тензор. Фізичні причини появи анізотропії при проходженні хвилі крізь ізотропне середовище з просторовою дисперсією.
87. Електромагнітні хвилі у середовищі з просторовою і часовою дисперсією. Тензор діелектричної проникності ізотропного середовища. Дисперсійні співвідношення для поперечних і поздовжніх хвиль.
88. Дисипація енергії хвилі у середовищі з дисперсією.
89. Густина електромагнітної енергії у середовищі з часовою та просторовою дисперсією.
90. Випромінювання Вавілова-Черенкова.
91. Поляризаційні втрати енергії частинки.
92. Перехідне випромінювання при проходженні частинкою межі поділу вакуум-ідеальний провідник.
93. Геометрична оптика. Рівняння ейконалу при поширенні променя у прозорому середовищі. Принцип Ферма.

10. Рекомендоване методичне забезпечення

Основна література

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. The classical theory of fields. Oxford: Pergamon, 1971. 374 p.
2. Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous media. Oxford: Pergamon, 1984. 460 p.
3. Jackson J.D. Classical Electrodynamics, 3rd ed. New York: Wiley, 1999. 808 p.
4. Скалозуб В. В., Гулов О. В., Класична електродинаміка. Київ: Вища освіта, 2011. 206 с.
5. ННІ «ФТФ» «Задачі зі спеціальної теорії відносності та електродинаміки».
6. ННІ «ФТФ» «Задачі з електродинаміки суцільних середовищ».

Допоміжна література

1. Feynman R., Leighton R., Sands M. The Feynman Lectures on Physics, V. II. <https://www.feynmanlectures.caltech.edu>.
2. B.G. Levich, Theoretical physics: An advanced text. V. 1. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1970. 395 p.
3. Levich B.G. Theoretical physics: An advanced text. V. 2. New York: Wiley, 1971. 646 p.
4. Tamm I.E. Fundamentals of the theory of electricity. Mir, 1979. 684 p.
5. Pauli W. Theory of relativity. New York: Pergamon, 1958. 241 p.
6. Ugarov V.A. Special theory of relativity. Mir, 1979. 406 p.
7. Carroll S. Spacetime and geometry. An introduction to general relativity. San Francisco: Addison Wesley, 2004. 513 p.
8. Скалозуб В. В., Гулов О. В., Класична макроскопічна електродинаміка. Дніпро: Вид-во ДНУ, 2010. 172 с.

Інформаційні ресурси

1. Веб-ресурси кафедри, мережа інтернет.
2. Бібліотека ХНУ імені В.Н. Каразіна.