

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)

Кузнецов П.Б.

(вказати П.Б. прізвище)

“ 28 грудня 2023 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**  
**Проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину**

(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	за вибором
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 “Проходження іонізуючого випромінення крізь речовину” 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 отриманні студентами знань про основні електродинамічні процеси, що відбуваються при проходженні швидких заряджених частинок, рентгенівських фотонів та гамма-квантів крізь речовину, в оволодінні методами теоретичного опису цих процесів та обчислення їх основних характеристик.

#### 1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основними завданнями є засвоєння студентами фізичних властивостей електродинамічних процесів, що породжуються взаємодією швидких заряджених частинок та жорстких фотонів із аморфною та кристалічною речовиною, та формування навичок обчислення їх основних характеристик. Зокрема це стосується таких процесів як фотоіонізація, ефект Комптона, народження електрон-позитронних пар жорсткими гамма-квантами, дифракція рентгенівських фотонів у кристалах, іонізаційні втрати енергії частинок, їх багатократне розсіювання, каналювання заряджених частинок у кристалах, а також різноманітні види електромагнітного випромінювання частинками, як-от гальмівне, перехідне, дифракційне, характеристичне, випромінювання Сміта-Парселла та Вавілова-Черенкова, а також параметричне рентгенівське випромінювання.

Загальні компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення дисципліни

“Проходження іонізуючого випромінення крізь речовину”:

- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. **(ЗК-1)**
- Навички здійснення безпечної діяльності. **(ЗК-10)**

Фахові компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення дисципліни

“Проходження іонізуючого випромінення крізь речовину”:

- Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп’ютерних технологій. **(СК-5)**

- Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем. **(СК-6)**
- Здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв'язування фізичних задач і моделювання фізичних систем. **(СК-10)**

### 1.3. Кількість кредитів

4

### 1.4 Загальна кількість годин

120

<b>1.5. Характеристика навчальної дисципліни</b>	
За вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
4-й	–
Семестр	
8-й	–
Лекції	
70 год.	–
Практичні, семінарські заняття	
0 год.	–
Лабораторні заняття	
0 год.	–
Самостійна робота	
50 год.	–
Індивідуальні завдання	
1	

### 1.6. Заплановані результати навчання

полягають у тому, що внаслідок опанування курсу “Проходження іонізуючого випромінення крізь речовину” студенти мають засвоїти фізичні властивості електродинамічних процесів, що мають місце при проходженні швидких заряджених частинок та жорстких фотонів крізь аморфні та кристалічні речовини, та здобути навички теоретичного опису основних характеристик цих процесів.

Згідно з освітньо-професійною програмою «Прикладна фізика» спеціальність 105 – «прикладна фізика та наноматеріали» 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)**
- Розуміти закономірності розвитку прикладної фізики, її місце в розвитку техніки, технологій і суспільства, у тому числі в розв'язанні екологічних проблем. **(Зн-3)**
- 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**

### **Розділ 1. Рух заряджених частинок в аморфних і кристалічних середовищах.**

**Тема 1.** Поняття перерізу розсіювання та передачі енергії. Мікроскопічний та макроскопічний переріз. Перерізи розсіювання та передачі енергії атомам для різних типів частинок.

**Тема 2.** Середньоквадратичне значення кута багатократного розсіювання. Кутовий розподіл частинок при багатократному розсіюванні. Розподіли Гоудсмита-Саундерсона та Мольєра.

**Тема 3.** Рух частинок в орієнтованих кристалах. Осьове та площинне каналювання. Механізми повороту пучків за допомогою зігнутих кристалів.

### **Розділ 2. Взаємодія фотонів із речовиною.**

**Тема 4.** Фотоіонізація атомів.

**Тема 5.** Розсіювання електромагнітних хвиль вільними та зв'язаними зарядами. Формула Томсона. Ефект Комптона.

**Тема 6.** Народження фотонами електрон-позитронних пар.

**Тема 7.** Дифракція рентгенівських фотонів у кристалах.

**Тема 8.** Поле релятивістської зарядженої частинки у речовині. Метод віртуальних фотонів.

### Розділ 3. Іонізаційні втрати енергії.

**Тема 9.** Діапазон прицільних параметрів, важливих для процесу іонізаційних втрат енергії (ІВЕ). Середня величина ІВЕ нерелятивістської частинки. Формула Бора. Вплив квантових ефектів.

**Тема 10.** Середня величина ІВЕ релятивістської частинки. Формула Бете-Блоха. Повна та обмежена величина ІВЕ. Ефект густини.  $\delta$ -електрони. Крива Брегга.

**Тема 11.** Кінетичне рівняння для функції розподілу імовірності величини ІВЕ у тонкій мішені. Функція розподілу Ландау для величини ІВЕ частинки у тонкій мішені. Найбільш імовірна величина ІВЕ частинки у тонкій мішені.

### Розділ 4. Випромінювання заряджених частинок у речовині.

**Тема 12.** Гальмівне випромінювання. Його повна інтенсивність і спектр. Формула Бете-Гайтлера. Ефекти Ландау-Померанчука-Мігдала та Терновського-Шульги-Фоміна.

**Тема 13.** Перехідне випромінювання. Випадки терагерцового, оптичного та рентгенівського діапазону частот. Рентгенівське перехідне випромінювання у багатошаровій мішені.

**Тема 14.** Дифракційне випромінювання. Випромінювання Сміта-Парселла.

**Тема 15.** Випромінювання Вавілова-Черенкова.

**Тема 16.** Іонізація атомних К-оболонок і характеристичне рентгенівське випромінювання.

**Тема 17.** Параметричне рентгенівське випромінювання у кристалі. Дифраговане рентгенівське перехідне випромінювання.

## 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
<b>Розділ 1.</b> Рух заряджених частинок в аморфних і кристалічних середовищах.												
Разом за розділом 1	30	15				15	-	-	-	-	-	-
<b>Розділ 2.</b> Взаємодія фотонів із речовиною.												
Разом за розділом 2	30	15				15	-	-	-	-	-	-
<b>Розділ 3.</b> Іонізаційні втрати енергії.												
Разом за розділом 3	20	15			•	5	-	-	-	-	-	-
<b>Розділ 4.</b> Випромінювання заряджених частинок у речовині.												
Разом за розділом 4	40	25				15	-	-	-	-	-	-
<b>Усього годин</b>	120	70				50	-	-	-	-	-	-

#### 4. Теми аудиторних практичних занять

Аудиторних практичних занять за курсом “Проходження іонізуючого випромінення крізь речовину” не передбачено.

#### 5. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	Форма контролю
1	Рух заряджених частинок в аморфних і кристалічних середовищах	15	перевірка домашнього завдання, опитування
2	Взаємодія фотонів із речовиною	15	перевірка домашнього завдання, опитування
3	Іонізаційні втрати енергії	5	перевірка домашнього завдання, опитування
4	Випромінювання заряджених частинок у речовині	15	перевірка домашнього завдання, опитування
	<b>Разом</b>	50	

#### 6. Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання передбачено у вигляді

- двох поточних контрольних робіт: перша контрольна за розділами 1-2, друга – за розділами 3-4. Кожна контрольна робота оцінюється 15 балами;
- курсової роботи (письмової), яка передбачає самостійний вибір студентом теми з запропонованих тем або теми з інших джерел, оцінюється 20 балами.

#### 7. Методи навчання

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

#### 8. Методи контролю

**Поточний контроль** складається з:

- 1) активної участі в аудиторних заняттях та виконання домашніх завдань із розв’язування задач (ваговий бал – 10);
- 2) контрольних робіт (ваговий бал – 30);
- 3) курсової роботи (ваговий бал – 20)

**Підсумковий контроль** проводиться у формі заліку (ваговий бал – 40).

Залікове завдання: білет містить два теоретичних питання (ваговий бал – 30).

Число балів, які студент отримав на заліку, є сумою балів, що були отримані за кожне завдання з 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 заліку

1. Мікроскопічний та макроскопічний переріз розсіювання та передачі енергії.
2. Кутовий розподіл частинок при багатократному розсіюванні в аморфній речовині.
3. Осьове та площинне каналювання заряджених частинок в орієнтованих кристалах.
4. Механізми повороту пучків заряджених частинок за допомогою зігнутих кристалів.
5. Фотоіонізація атомів.
6. Розсіювання електромагнітних хвиль вільними та зв'язаними зарядами. Формула Томсона.
7. Ефект Комптона.
8. Народження фотонами електрон-позитронних пар у полі ядра.
9. Дифракція рентгенівських фотонів у кристалах.
10. Поле релятивістської зарядженої частинки у речовині.
11. Метод віртуальних фотонів.
12. Середня величина іонізаційних втрат енергії нерелятивістської частинки. Формула Бора. Вплив квантових ефектів.
13. Середня величина іонізаційних втрат енергії релятивістської частинки. Формула Бете-Блоха. Крива Брегга.
14. Ефект густини в іонізаційних втратах енергії.
15. Обмежена величина іонізаційних втрат енергії релятивістської частинки.  $\delta$ -електрони.



16. Кінетичне рівняння для функції розподілу імовірності величини іонізаційних втрат енергії у тонкій мішені.
17. Функція розподілу Ландау для величини іонізаційних втрат енергії частинки у тонкій мішені. Найбільш імовірна величина іонізаційних втрат.
18. Інтенсивність і спектр гальмівного випромінювання заряджених частинок у речовині. Формула Бете-Гайтлера.
19. Ефекти Ландау-Померанчука-Мігдала та Терновського-Шульги-Фоміна у гальмівному випромінюванні заряджених частинок у речовині.
20. Перехідне випромінювання в терагерцовому та оптичному діапазоні частот при проходженні частинкою крізь провідну мішень.
21. Рентгенівське перехідне випромінювання у тонкій мішені та у багат шаровій періодичній структурі.
22. Дифракційне випромінювання при прольоті частинки крізь круговий отвір у провідному екрані.
23. Випромінювання Сміта-Парселла.
24. Випромінювання Вавілова-Черенкова.
25. Іонізація атомних К-оболонки і характеристичне рентгенівське випромінювання.
26. Параметричне рентгенівське випромінювання у кристалі.
27. Дифраговане рентгенівське перехідне випромінювання у кристалі.

## **10. Рекомендоване методичне забезпечення**

### **Основна література**

1. Шматко Є.С., Гірка І.О., Карташов В.М. Проходження іонізуючих випромінювань крізь речовину. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2013. 132 с.
2. Sigmund P. Particle penetration and radiation effects. Berlin-Heidelberg: Springer, 2006. 437 p.
3. Carron N. J. An introduction to the passage of energetic particles through matter. Boca Raton: Taylor & Francis. 2007. 384 p.
4. Ter-Mikaelyan M. L. High-energy electromagnetic processes in condensed media. New York: Wiley, 1972. 468 p.
5. Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of continuous media. Oxford: Pergamon, 1984. 460 p.
6. Jackson J.D. Classical Electrodynamics, 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley, 1999. 808 p.
7. Akhiezer A. I., Shul'ga N. F. High energy electrodynamics in matter. Amsterdam: Gordon and Breach Publ., 1996. 388 p.

### **Допоміжна література**

1. Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K. et al. (Particle Data Group). Review of particle physics. Phys. Rev. D. 2018. Vol. 98. P. 030001.
2. Landau L.D. On the energy loss of fast particles by ionization. J. Phys. USSR.1944. Vol. 8. P. 201.
3. Sørensen A.H. Atomic K-shell excitation at ultrarelativistic impact energies. Phys. Rev. A. 1987. Vol. 36. P. 3125.
4. Shibata et al. Coherent Smith-Purcell radiation in the millimeter-wave region from a short-bunch beam of relativistic electrons. Phys. Rev. E. 1998. Vol. 57. P. 1061.
5. Трофименко С.В. Інтерференційні ефекти в іонізаційних втратах, перехідному та когерентному рентгенівському випромінюванні релятивістських частинок: Дис. на здобуття наукового ступеня доктора наук / ННЦ Харківський фізико-технічний інститут. Харків, 2021. 348 с. <https://www.kipt.kharkov.ua/councils/2021/Trofymenko/DisTrofymenko.html>

#### **Інформаційні ресурси**

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