Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

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

“**ЗАТВЕРДЖУЮ**”

Перший проректор

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

“\_\_\_\_\_\_”\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2020\_ 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»

освітня програма Прикладна фізика

спеціалізація

вид дисципліни обов’язкова

ННІ «Фізико-технічний факультет»

2020/ 2021 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою ННІ «Фізико-технічний факультет»

“\_27\_” \_\_\_серпня\_\_\_ 2020\_ року, протокол №8

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Фомін С.П. - доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент (0,25 посадового окладу) за сумісництвом кафедри теорії ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера

Протокол від “26”\_\_серпня\_\_\_\_2020 року № 16

Завідувач кафедри ФЯВЕ імені О. І. Ахієзера \_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Шульга М.Ф.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією ННІ «Фізико-технічний факультет»)

назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна

Протокол від “\_27\_”\_серпня\_\_2020 року № 10

Голова методичної комісії ННІ «Фізико-технічний факультет»)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_Юнаков М.М.\_

(підпис) (прізвище та ініціали)

**Вступ**

Програма навчальної дисципліни **«Проходження іонізуючого випромінювання крізь речовину»** складена відповідно до освітньої освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки фахівців першого рівня вищої освіти - бакалаврів,

галузь знань: 10 природничі науки;

спеціальність 105 прикладна фізика та наноматеріали;

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни полягає у засвоєнні основних видів іонізуючого випромінення та механізмів його взаємодії з речовиною; основ теорії багатократного розсіяння швидких заряджених частинок в аморфних та кристалічних середовищах; теорії радіаційних та іонізаційних втрат енергії частинок у речовині; явищ перехідного та черенковського випромінювання, фотоефекту, Комптон-ефекту та народження електрон-позитронних пар при проходженні гамма-випромінення крізь речовину, а також вивченні різноманітних ефектів, що виникають при проходженні іонізуючого випромінювання крізь речовину.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни полягають у формуванні підходів до свідомого застосування властивостей різних видів іонізуючого випромінення та ефектів, що виникають при його проходженні цього крізь аморфні та кристалічні мішені, при розробці нових методів керування пучками такого виромінення, діагностики пучків та створенні нових детекторів для реєстрації випромінення.

1.3. Кількість кредитів – 4

1.4. Загальна кількість годин – 64.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.5. Характеристика навчальної дисципліни | |
| Нормативна | |
| Денна форма навчання | Заочна (дистанційна) форма навчання |
| Рік підготовки | |
| 4-й | -й |
| Семестр | |
| 7-й | -й |
| Лекції | |
| год. | 70 год. |
| Практичні, семінарські заняття | |
| год. | год. |
| Лабораторні заняття | |
| год. | год. |
| Самостійна робота | |
| год. | 50 год. |
| Індивідуальні завдання | |
| год. | |

1.6. Заплановані результати навчання

В результаті навчання студенти повинні:

знати: основні фізичні процеси взаємодії заряджених частинок і гамма-квантів з речовиною;

вміти: робити елементарні розрахунки кутових розподілів пучків частинок, іонізаційних та радіаційних втрат енергії зарядженими частинками, та гамма-квантами при проходженні крізь речовину.

**2. Тематичний план навчальної дисципліни**

### *Розділ 1. Проходження заряджених частинок крізь речовину*

# *Тема 1. Загальні поняття та механізми взаємодії частинок і випромінювань з речовиною*

# Вступ: еволюція уявлень про механізми взаємодії частинок і випромінювань з речовиною. Види іонізуючих випромінювань. Поняття про ефективний поперечний переріз. Зв’язок прицільної відстані, потенціалу розсіяння та диференціального перерізу. Повний та парціальні перерізи. Макроскопічний переріз процесу. Середня довжина вільного пробігу заряджених частинок. Класифікація мішеней за товщиною.

# *Тема 2. Пружне розсіювання заряджених частинок на атомах*

# Диференційний переріз розсіяння в термінах кутів відхилення. Розсіювання заряджених частинок у Кулонівському полі атома. Формула Резерфорда. Розсіяння релятивістський електронів на атомах. Формула Мотта. Формфактори ядер. Розподіл заряду в ядрах. Модель Фермі.

# *Тема 3. Багатократне розсіяння заряджених частинок у аморфній мішені*

Багатократне пружне розсіяння легких заряджених частинок на атомних ядрах. Середній квадрат кута багатократного розсіяння. Розсіювання електронів і позитронів на атомних електронах. Дельта-електрони. Ефект екранування Кулонівського потенціалу атома. Радіус Томаса-Фермі. Метод кінетичного рівняння для опису багатократого розсіяння. Дифузійне наближення. Рівняння Фоккера-Планка. Теорія Бете-Молієр. Вклад однократного розсіяння.

# *Тема 4. Розсіювання заряджених частинок у орієнтованих кристалах*

Кореляції при розсіюванні заряджених частинок на атомах кристалічної гратки. Наближення неперервного поля ланцюжка атомів. Функція відхилення частинки в полі ланцюжка атомів. Явище радужного розсіяння. Явище каналювання. Теорія Ліндхарда. Критичний кут осьового та площинного каналювання. Каналювання частинок різного знаку заряду. Ефекти деканалювання та реканалювання. Довжина деканалювання. Ймовірність близьких зіткнень з атомами кристалічної гратки.

# *Тема 5. Відхилення пучків заряджених частинок зігнутим кристалом*

Механізм Циганова площинного каналювання у зігнутому кристалі. Механізм Таратіна-Воробйова об'ємного відбивання. Механізм Гриненка-Шульги стохастичного розсіяння на ланцюжках атомів зігнутого кристалу. Приклади практичного використання зігнутих кристалів для керування параметрами пучків заряджених частинок високих енергій. Каналювання швидких заряджених частинок у нанотрубках та фулеритах.

# *Тема 6. Іонізаційні втрати енергії заряджених частинок*

Енергія іонізації. Гальмівна здатність важких заряджених частинок. Поправка на ефект оболонок та ефект густини. Гальмівна здатність електронів і позитронів. Іонізаційні потенціали різних елементів. Гальмівна здатність складних речовин. Крива Бете-Блоха. Флуктуації іонізаційних втрат енергії (флуктуації Ландау). Довжина повного пробігу заряджених частинок. Крива Брегга. Страглінг. Іонізаційні втрати енергії частинок при каналюванні у кристалі.

### *Розділ 2. Генерація випромінення при проходженні заряджених частинок крізь речовину*

# *Тема 1. Радіаційні втрати енергії заряджених частинок*

Загальні співвідношення для гальмівного випромінювання електрона в Кулонівському полі ядра (класичний і квантовий підхід). Гальмівне випромінювання ультрарелятивістського електрона. Довжина формування гальмівного випромінювання. Ефект екранування кулонівського поля ядра. Потенціали Томаса-Фермі, Молієр, Дойль-Тернера. Формула Бете-Гайтлера. Гальмівне випромінювання на атомних електронах. Повні радіаційні втрати електронів у речовині. Радіаційна довжина. Критична енергія. Гальмівне випромінювання мюонів та протонів.

# *Тема 2. Вплив багатократного розсіяння на гальмівне випромінювання заряджених частинок*

Вплив багатогократного розсіяння на гальмівне випромінювання ультрарелятивістського електрона. Эффект Ландау-Померанчука-Мигдала (ЛПМ-ефект) пригнічення гальмівного випромінювання в аморфному середовищі. ЛПМ ефект і модифікація радіаційної довжини при надвисоких енергіях. СЛАК Е-146 експеримент по перевірці теорії Мігдала ЛПМ-ефекту. Особливості пригнічення випромінювання в тонкому шарі речовини. Довжина когерентності та просторово-часовий розвиток процесу гальмівного випромінювання. Кількісна теорія ефекту пригнічення випромінювання в тонкому шарі речовини. ЦЕРН експеримент NA63 по перевірці ТШФ-ефекту. Особливості спектрально-кутових розподілів випромінення в умовах ТШФ-ефекту.

*Тема 3. Когерентне гальмівне випромінювання швидких заряджених частинок у кристалі*

Теорія Феретті-Тер-Мікаеляна-Юбералла когерентного гальмівного випромінювання в кристалі. Випромінювання при каналюванні и надбар'єрному русі релятивістських електронів і позитронів вздовж кристалічних площин чи осей. Спектральні та спектрально-кутові розподіли випромінення. Поляризація когерентного гальмівного випромінення. Особливості спектрально-кутових розподілів випромінення та поляризації в умовах ТШФ-ефекту в тонкому кристалі. Практичне застосування когерентних ефектів при випромінюванні в кристалах: джерело інтенсивного рентгенівського та гамма-випромінювання, джерело позитронів.

*Тема 4. Вплив поляризації середовища на випромінювання швидких заряджених частинок*

Шлях формування випромінювання. Поляризація середовища. Ефект Тер-Мікаеляна поляризаційного пригнічення випромінювання. Випромінювання Вавілова-Черенкова. Основні положення теорії Франка-Тамма. Властивості випромінення Вавілова-Черенкова: енергетичний поріг, енергія випромінення та кількість фотонів на одиниці шляху. Порівняльні характеристики черенковського та гальмівного випромінювань. Застосування ефекту: селекція заряджених частинок по швидкостях, визначення заряду, покажчики напрямку. Черенковські детектори. Фізична природа перехідного випромінення (якісний опис). Основні характеристики перехідного випромінювання "назад" і "вперед". Принципова схема детекторів перехідного випромінення. Приклади практичного використання. Параметричне рентгенівське випромінювання в кристалі.

### *Розділ 3. Проходження гамма-випромінення крізь речовину*

# *Тема 1. Загальні поняття та механізми взаємодії гамма-випромінення з речовиною*

# Лінійний та масовий коефіцієнти поглинання гамма-випромінення. Основні механізми взаємодії гамма-випромінення з речовиною. Фотоелектричний ефект. Залежність перерізу фотоефекту від енергії гамма-кванта та заряду ядра атома. Характеристичне випромінення. Спектр і кутові розподіли фотоелектронів. Комптон-ефект. Кінематичні співвідношення. Диференціальні перерізи за кутом та енергією. Повний поперечний переріз. Зворотній Комптон-ефект.

*Тема 2. Утворення електронно-позитронних пар гамма-квантом у речовині*

# Утворення електронно-позитронних пар в аморфній мішені та в орієнтованому кристалі. Ситуація поблизу порога народження. Позитроній. Релятивістський та ультрарелятивістський випадки. Ефект екранування. ЛПМ-ефект при народженні пар. Ефект Чудакова. Анігіляція позитронів. Повний поперечний переріз взаємодії рентгенівського та гамма-випромінювань із речовиною. Лінійний і масовий коефіцієнти ослаблення твердого фотонного випромінювання. Середня довжина вільного пробігу фотона у речовині.

# *Тема 3. Електронно-фотонні зливи у речовині*

Основні характеристики електронно-фотонних злив у речовині. Апроксимації Грейзена функції Нішімури та Камати. Енергетичний спектр зливових електронів Тамма - Біленького. Енергетичний спектр зливових фотонів. Надлишок зливових електронів Аскарьяна. Роль ефекту ЛПМ у каскадних зливах. Порівняльні характеристики злив, що розвиваються в різних речовинах. Електронно-фотонні зливи в орієнтованому кристалі.

**3. Структура навчальної дисципліни**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Назви розділів і тем | Кількість годин | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Денна форма | | | | | | | | | Заочна форма | | | | | | | | | | |
| Усього | | у тому числі | | | | | | | Усього | у тому числі | | | | | | | | | |
| л | п | лаб | | інд | | ср | л | | п | | лаб | | інд | | ср | |
| 1 | 2 | | 3 | 4 | 5 | | 6 | | 7 | 8 | 9 | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | |
| Розділ 1.Проходження заряджених частинок крізь речовину | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Тема 1. Загальні поняття та механізми взаємодії частинок і випромінення з речовиною | 6 | | 4 |  |  | |  | | 2 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| Тема 2. Пружне розсіювання заряджених частинок на атомах | 6 | | 4 | (+1) |  | |  | | 2 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| Тема 3. Багатократне розсіяння заряджених частинок у аморфній мішені | 8 | | 4 |  |  | |  | | 4 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| Тема 4. Розсіювання заряджених частинок у орієнтованих кристалах | 10 | | 4 | (+1) |  | |  | | 6 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| Тема 5. Відхилення пучків заряджених частинок зігнутим кристалом | 10 | | 4 | (+1) |  | |  | | 6 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| Тема 6. Іонізаційні втрати енергії заряджених частинок | 10 | | 4 | (+1) |  | |  | | 6 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| Разом за розділом 1 | 50 (+4) | | 24 | (+4) |  | |  | | 26 |  |  | |  | |  | |  | |  | |
| **Розділ 2.**Генерація випромінення при проходженні заряджених частинок крізь речовину | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Тема 1. Радіаційні втрати енергії заряджених частинок | | 14 | 8 | (+1) |  | |  | | 6 |  | |  |  | |  | |  | |  | |
| Тема 2. Вплив багатократного розсіяння на гальмівне випромінювання заряджених частинок | | 16 | 8 | (+1) |  | |  | | 8 |  | |  |  | |  | |  | |  | |
| Тема 3. Когерентне гальмівне випромінювання швидких заряджених частинок у кристалі | | 10 | 4 | (+1) |  | |  | | 6 |  | |  |  | |  | |  | |  | |
| Тема 4. Вплив поляри­зації середовища на випромінювання заряджених частинок | | 16 | 8 |  |  | |  | | 8 |  | |  |  | |  | |  | |  | |
| Разом за розділом 2 | | 56 (+3) | 28 | (+3) |  | |  | | 28 |  | |  |  | |  | |  | |  | |
| **Розділ 3**. Проходження гамма-випромінювання крізь речовину | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Тема 1. Загальні поняття та механізми взаємодії гамма-випромінення з речовиною. | | 8 | 4 |  | |  | |  | 4 |  | |  | |  | |  | |  | |  |
| Тема 2. Утворення електронно-позитрон­них пар гамма-квантом у речовині. | | 8 | 4 | (+1) | |  | |  | 4 |  | |  | |  | |  | |  | |  |
| Тема 3. Електронно-фотонні зливи у речовині. | | 8 | 4 |  | |  | |  | 4 |  | |  | |  | |  | |  | |  |
| Разом за розділом 3 | | 24 (+2) | 12 | (+2) | |  | |  | 12 |  | |  | |  | |  | |  | |  |
| Усього годин | | 130  (+14) | 64 |  | |  | |  | 66 |  | |  | |  | |  | |  | |  |

**4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять**

Не передбачені

**5. Завдання для самостійної роботи**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  з/п | Назва теми | Кількість  годин | Форма  контролю |
| 1. | Класичний опис зіткнення двох тіл | 2 | Залік |
| 2. | Переріз розсіювання | 2 | Залік |
| 3. | Розподіли та моменти випадкової величини | 4 | Залік |
| 4. | Рівняння руху частинок у полі кристалічної гратки | 6 | Залік |
| 5. | Каналювання частинок різного знаку заряду у кристалі | 6 | Залік |
| 6. | Максимальна передана енергія при зіткненнях | 6 | Залік |
| 7. | Випромінювання електрона в зовнішніх полях | 6 | Залік |
| 8. | Спектрально-кутова щільність випромінювання електронів у класичній електродинаміці | 8 | Залік |
| 9. | Поляризаційні характеристики випромінення | 6 | Залік |
| 10. | Фізична природа діелектричної проникності середовища | 8 | Залік |
| 11. | Кінематика прямого та зворотного Комптон-ефекту | 4 | Залік |
| 12. | Кінематичні співвідношення при народженні пар | 4 | Залік |
| 13. | Зона формування процесу народження електрон-позитронних пар | 4 | Залік |
|  | Разом | 66 |  |

**6. Індивідуальні завдання**

Не передбачені

**7. Методи контролю**

Контрольна робота, усні опитування, перевірка повноти конспектів.

**8. Схема нарахування балів**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поточний контроль та самостійна робота  Разом | | | | | | | | | | | | | | | |
| Розділ 1 | | | | | | | | | Розділ 2 | | | | | | |
| Т1 | Т2 | | Т3 | Т4 | | Т5 | T6 | | Т1 | Т2 | | Т3 | | Т4 | |
| 2 | 3 | | 3 | 2 | | 2 | 3 | | 4 | 4 | | 4 | | 4 | |
| Поточний контроль та самостійна робота  Разом | | | | | | | | | | | | | | | |
| Розділ 3 | | | | | | | | Контрольна робота, передбачена навчальним планом | | | Разом | | Залік | | Сума |
| Т1 | | Т2 | | | Т3 | | | 20 | | | 60 | | 40 | | 100 |
| 4 | | 3 | | | 2 | | |

Т1, Т2 ... Т6 – теми розділів.

**Шкала оцінювання**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру | Оцінка за національною шкалою | |
| для чотирирівневої шкали оцінювання | для дворівневої шкали оцінювання |
| 90 – 100 | відмінно | зараховано |
| 70-89 | добре |
| 50-69 | задовільно |
| 1-49 | незадовільно | не зараховано |

9. Рекомендована література

Основна література

1. Голдстейн Г. Классическая механика. – М.: Наука, 1975.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М.: Наука, 1988. -216с.
3. Джексон Дж. Классическая электродинамика. – М.: Мир, 1965. -702с.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория поля. – М.: Наука, 1988. -509с.
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая механика. – М.: Наука, 1989. -724с.
6. Ахиезер А.И., Берестецкий С.П. Квантовая электродинамика. – М.: Наука, 1969. -824с.
7. Мухин К.Н. Введение в ядерную физику. – М.: Атомиздат. 1963. -588с.
8. Вальтер А.К., Залюбовский И.И. Ядерная физика. – Харьков: Основа, 1991. -479с.
9. Хаякава С. Физика космических лучей. Частю 1. Ядерно-физический аспект. – М.: Мир, 1973. -701с.
10. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Изд. АН Арм.ССР, Ереван, 1969. -457с.
11. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Электродинамика высоких энергий в веществе. – М.: Наука, 1993. -344с.
12. Шульга Н.Ф. Некоторые вопросы теории рассеяния быстрых частиц в веществе и во внешних полях. – Киев: Наукова думка, 2010. -197с.
13. Гарибян Г.М., Ян Ши Рентгеновское переходное излучение. Изд. АН Арм.ССР, Ереван, 1983. -320с.
14. Франк И.М. Излучение Вавилова-Черенкова. Вопросы теории. – М.: Наука, 1988. - 285с.

Допоміжна література

1. Карташев В.М., Шматко Е.С. Охрана труда и физические основы техники электрической, пожарной и радиационной безопасности. Уч. пособие, ФТФ ХНУ, Харьков, 2005. -171с.
2. Akhiezer A.I., Shul'ga N.F., Fomin S.P. Landau-Pomeranchuk-Migdal Effect. - Cambridge Sci. Publ., 2005, 215p.
3. Оцуки Ё.-Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. – М.: Мир, 1985. -277с.
4. Абрамов А.И. Основы ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1983. -256с.
5. Будагов Ю.А., Мерзон Г.И., Ситар Б., Чечин В.А.. Ионизационные измерения в физике высоких энергий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. -224с.
6. Зрелов В.П. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий, т.т. 1 и 2. – М.: Атомиздат, 1968.

**10. Посиланная на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**

1. http://nuclab.spbu.ru/images/books/
2. http://nuclphys.sinp.msu.ru/
3. https://www.iaea.org/