

**СИЛАБУС  
навчальної дисципліни  
“РЕНТГЕНІВСЬКИЙ ФАЗОВИЙ КОНТРАСТ / X-RAY PHASE  
CONTRAST IMAGING”**

<b>Галузь знань</b>	10 Природничі науки
<b>Шифр та назва спеціальності</b>	104 Фізика та астрономія
<b>Рівень вищої освіти</b>	Третій (освітньо-науковий)
<b>Статус дисципліни</b>	вибіркова
<b>Викладач (розробник)</b>	
	<p><b>Лебедь Олександр Анатолійович</b> Доктор фізико-математичних наук, старший дослідник, <a href="mailto:lebedO@ukr.net">lebedO@ukr.net</a>, Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, м. Суми</p>
<b>Загальна інформація про дисципліну</b>	
<b>Анотація</b>	<p>Навчальна дисципліна стосується одного з найперспективніших неруйнівних методів дослідження – рентгенівського фазового контрасту. Дисципліна частково носить міждисциплінарний характер, тому буде цікава та корисна слухачам, що займаються неруйнівними методів дослідження внутрішньої структури об'єктів, біофізикою, прискорювальною та вакуумною технікою, фізикою пучків заряджених частинок, протонною літографією та обробкою цифрових сигналів.</p>
<b>Мета</b>	<p>Метою викладання дисципліни є вироблення у аспірантів фізичного та інженерного підходу відносно застосування методів рентгенівського фазового контрасту для досліджень в області матеріалознавства та медицини.</p> <p>Завдання дисципліни – забезпечити глибоку підготовку здобувачів в області сучасних рентгенівських методів дослідження речовини, включаючи поглиблення фізичних уявлень про оптику в діапазоні рентгенівського випромінювання, класифікацію і особливості застосування рентгенівських джерел, розрахунок оптимальних параметрів для їх практичної реалізації, методика обробки зображень, а також виробити у студентів навички вирішення</p>

	практичних завдань в даній області.	
<b>Результати навчання</b>	<p>Внаслідок вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен бути здатним продемонструвати такі</p> <p><b>Компетентності:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Здатність виконувати прикладні розрахунки для практичної реалізації методів рентгенівського фазового контрасту для застосувань в медицині та матеріалознавстві.</li> <li>• Здатність застосовувати аналітичні підходи та програмні пакети у вирішенні загально-фізичних та прикладних задач.</li> <li>• <b>Результати навчання:</b></li> <li>• Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з рентгенівського фазового контрасту. Вміти застосовувати ці знання для фундаментальних і прикладних досліджень.</li> <li>• Виконувати прикладні розрахунки для проведення фізичних експериментів з дослідження об'єктів методами фазового контрасту, прогнозувати їх результати.</li> <li>• Мати навички в обробці цифрових сигналів, зокрема, рентгенівських фазоконтрастних зображень.</li> </ul>	
<b>Обсяг дисципліни</b>	<p>Кількість кредитів – 3</p> <p>Загальна кількість годин — 90 год.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Лекції — 30 год.;</li> <li>○ Практичні — 10 год.;</li> <li>○ Лабораторні — 4 год.;</li> <li>○ Самостійна робота — 44 год.;</li> <li>○ Залік — 2 год.</li> </ul>	
<b>Форма підсумкового контролю</b>	Диференційний залік	
<b>Опис навчальної дисципліни</b>		
<b>Лекційні заняття</b>		
№ з/п	Назви тем	К-сть годин
1	<p><b>Загальне поняття про фазовий контраст.</b></p> <p>Вступ. Поняття про фазовий контраст. Умови реалізації фазового контрасту. Особливості реалізації в рентгенівському діапазоні випромінювання. Переваги рентгенівського фазового контрасту, застосування в медицині.</p>	2
2	<p><b>Електромагнітні хвилі та їх поширення.</b></p> <p>Рівняння Максвелла у вакуумі та середовищі. Хвильове рівняння, рівняння Гельмгольца. Принцип Гюйгенса-Френеля, дифракційний інтеграл. Поняття когерентності випромінювання. Скалярна теорія дифракції Френеля-Кірхгофа. Дифракція Френеля та Фраунгофера в рентгенівському діапазоні.</p>	4
3	<p><b>Генерація та характеристики рентгенівського випромінювання.</b></p>	6

	Фізичні основи генерації рентгенівського випромінювання. Спектральний та кутовий розподіл випромінювання. Суцільний і характеристичний спектр. Типи джерел рентгенівського випромінювання. Рентгенівські трубки. Синхротрони. Зворотне розсіювання Комптона. Джерело на базі прискорювача протонів Інституту прикладної фізики НАН України.	
4	<b>Фізичні основи фазового контрасту.</b> Взаємодія випромінювання з речовиною. Заломлення випромінювання, показник заломлення середовища. Закон Бугера – Ламберта – Бера. <b>Physical foundations of phase contrast.</b> Interaction of radiation with matter. Refraction of radiation, refractive index of the medium. Bouguer-Lambert-Beer law.	2
5	<b>Теоретичні основи фазового контрасту.</b> Метод дифракційного оператора. Рівняння переносу інтенсивності хвилі. Фазоконтрастне зображення як результат дифракції. Основні методи рентгенівської фазоконтрастної візуалізації. Проекційне наближення. Теоретична основа фазового контрасту методом вільного поширення.	4
6	<b>Практична реалізація рентгенівського фазового контрасту.</b> Рентгенівські методи дослідження об'єктів. Особливості методів фазового контрасту. Реалізація рентгенівського фазового контрасту на компактних джерелах випромінювання. Елементи рентгенівської оптики.	4
7.	<b>Моделювання формування фазоконтрастного зображення.</b> Узгодження оптимальних параметрів схеми експерименту. Зображення багат шарових об'єктів. Прояв розмірних ефектів. Теорема Ван-Ціттера-Церніке. Врахування часткової когерентності випромінювання.	4
8.	<b>Реєстрація та обробка фазоконтрастних зображень.</b> Детектування рентгенівського випромінювання. Типи детекторів, їх роздільна здатність та ефективність реєстрації. Обробка фазоконтрастних зображень. Фазоконтрастна томографія. Програмні пакети для обробки зображень.	4
<b>Разом (год.)</b>		<b>30</b>
<b>Теми практичних занять</b>		
1	Хвильове рівняння у середовищі. Плоскі та сферичні хвилі. Скалярна теорія дифракції Френеля-Кірхгофа.	2
2	Опис процесу зворотного розсіювання Комптона фотона на електроні. Визначення виходу характеристичного випромінювання з товстої мішені під дією електронного та протонного пучка.	2
3	Застосування методу дифракційного оператора. Розподіл інтенсивності в методі вільного поширення. Визначення ступеню просторової когерентності	2

	випромінювання.	
4	Моделювання та обробка рентгенівських фазоконтрастних зображень.	2
5	Презентації здобувачів на теми, що стосується фазового контрасту та іншої цікавої здобувачу області.	2
<b>Разом (год.)</b>		<b>10</b>
<b>Теми лабораторних занять</b>		
1	Знайомство з експериментальним каналом рентгенівського фазового контрасту Інституту прикладної фізики НАН України	2
2	Аналіз експериментальних даних, отриманих на каналі рентгенівського фазового контрасту	2
<b>Разом (год.)</b>		<b>4</b>
<b>Самостійна робота Опрацювання тем, які не входять до плану аудиторних занять</b>		
1	Історія розвитку фазового контрасту. Перспективи застосування рентгенівського фазового контрасту в матеріалознавстві. Закон ослаблення випромінювання в неоднорідному середовищі.	4
2	Загальний розв'язок хвильового рівняння в декартових, циліндричних та сферичних координатах. Функції Бесселя, поліноми Лежандра, сферичні спеціальні функції.	4
3	Гальмівне випромінювання електронів на мішені рентгенівської трубки. Максимальне термічне навантаження на анод рентгенівської трубки.	2
4	Лазери на вільних електронах. Рентгенівські джерела перехідного випромінювання. Лазерно-плазмові джерела.	4
5	Теоретичні основи основних методів фазового контрасту.	8
6	Реалізація рентгенівського фазового контрасту на джерелах синхротронного випромінювання.	4
7	Рентгенівські лінзи, дифракційні решітки та зонні пластинки.	4
8	Фізичні принципи роботи основних типів детекторів рентгенівського випромінювання. Детекторні панелі, коригування парціальних зображень.	4
9	Томографія, перетворення Радона.	2
10	Вивчення актуального питання на вибір, що стосується фазового контрасту та іншої області: біофізики, прискорювальної техніки, фізики пучків заряджених частинок, детекторів випромінювання, протонної літографії, обробки цифрових сигналів. Підготовка доповіді та презентації з цього питання.	8
<b>Разом (год.)</b>		<b>44</b>

## ОЦІНЮВАННЯ ЗА ОСВІТНІМ КОМПОНЕНТОМ

### Сумативне оцінювання

1.1. Для оцінювання очікуваних результатів навчання передбачено

№	Методи сумативного оцінювання	Бали / Вага у загальній оцінці	Дата складання
1.	Практичні заняття	45 балів / 48 %	Згідно графіка навчального процесу
2.	Лабораторні заняття	15 балів / 12 %	
3.	Атестація (тест множинного вибору)	20 балів / 20%	
4.	Виконання індивідуальних завдань	20 балів / 20%	

### 1.2. Критерії оцінювання

№з/п	Вид діяльності	Оцінювання
1	Практичні заняття (5 занять)	Нарахування балів відбувається по шкалі: - відмінні відповіді 9-6 бали; - добрі відповіді 6-3 балів; -задовільні, достатні відповіді 3-1 бал. Максимум: 45 балів.
2	Лабораторні заняття (2 заняття)	Нарахування балів відбувається по шкалі: - відмінні відповіді 15-11бали; - добрі відповіді 11-7 балів; -задовільні, достатні відповіді 6-1 бал. Максимум: 15 балів
3	Атестація (тест множинного вибору) (2 тести)	Залежить від кількості вірних відповідей на тест: - 90% правильних відповідей 10-9 балів; - 80% правильних відповідей 8-7 бали; -70% правильних відповідей 6-5 бали; -60% правильних відповідей 5-4 бали; -50% правильних відповідей 3-1 бал; <50% правильних відповідей 0 балів; Максимум: 20 балів.
4	Індивідуальні завдання (4 завдання)	- Завдання виконано, здобувач добре орієнтується в матеріалі 5 балів. - Завдання виконані з незначними помилками, здобувач не достатньо орієнтується в теоретичному матеріалі 3-4 бали. - Завдання виконане не в повній мірі, здобувач не достатньо орієнтується в матеріалі 1-2 балів. - Завдання не виконане або виконане не вірно 0 балів. Максимум: 20 балів.

### Політика оскарження результатів оцінювання

Здобувач має право оскаржити результати оцінювання, звернувшись до викладача протягом 3-х робочих днів після оголошення балів. У разі незгоди з рішенням викладача, апеляція розглядається комісією згідно з [“Положення про апеляцію результатів підсумкового контролю знань здобувачів вищої освіти в ІПФ НАН України”](#).

### Методичне забезпечення

1. Тексти та конспекти лекцій
2. Методичні розробки для аспірантів з практичних занять
3. Доступ та опрацювання он-лайн ресурсів

### Рекомендована література

### **Базова**

1. E. Wolf, M. Born, Principles of Optics. – Cambridge Univ. Press, 2020. – 952 pp.
2. Хвильова оптика. Частина 1. Електромагнітна теорія світла та інтерференція: Підручник/Уклад.: В.Г. Колобродов. –К.:НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2017.–208 с
3. Хвильова оптика. Частина 2. Дифракція і поляризація світла: Підручник/Автор: В.Г. Колобродов. –К.:НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018.–240 с
4. D.M. Paganin, Coherent X-Ray Optics. – Oxford University Press, 2006. – 424 pp.
5. Quenot L, Bohic S, Brun E. X-ray Phase Contrast Imaging from Synchrotron to Conventional Sources: A Review of the Existing Techniques for Biological Applications. Applied Sciences. 2022; 12(19):9539.

### **Допоміжна**

1. Романюк М.О. Оптика : підручник / М.О.Романюк, А.С.Крочук, І.П.Пашук; за ред. проф. М.О.Романюка. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка. 2012. – 564 с.
2. Bruni, C. at all. (2009). ThomX - Conceptual Design Report.
3. Paganin, D., Pelliccia, D. (2019). Tutorials on X-ray Phase Contrast Imaging: Some Fundamentals and Some Conjectures on Future Developments.

### **Інтернет ресурси**

1. X-RAY DATA BOOKLET, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory <https://xdb.lbl.gov/>
2. Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського: <http://www.nbuv.gov.ua/>

### **Академічна доброчесність**

Здобувач вищої освіти повинен дотримуватись Етичного кодексу ученого України. Дотримання академічної доброчесності здобувачами освіти передбачає: самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання (для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей); посилання на джерела інформації у разі використання ідей, розробок, тверджень, відомостей; дотримання норм законодавства про авторське право і сум права; надання достовірної інформації про результати власної навчальної (наукової, творчої) діяльності, використані методики досліджень і джерела інформації. У випадку порушення академічної доброчесності – реагування відповідно до «Положення про академічну доброчесність в ІПФ НАН України».

### **Політика використання ІІІ**

Використання ІІІ регулюється “Положенням про академічну доброчесність наукових працівників та здобувачів вищої освіти в ІПФ НАН України”. Зокрема, дозволяється використання ІІІ для пошуку ідей або редагування тексту, проте фінальний результат має бути оригінальним. Пряме копіювання згенерованого тексту без посилань вважатиметься порушенням академічної доброчесності

### **Зворотній зв'язок**

Наприкінці курсу проводиться анонімне анкетування здобувачів щодо якості викладання та відповідності змісту дисципліни їхнім очікуванням.