МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Фізичний факультет
Кафедра фізики твердого тіла

Затверджено
На засіданні кафедри фізики твердого тіла фізичного факультету
Львівського національного університету імені Івана Франка
(протокол № 1 від 29 серпня 2025 р.)

Завідувач кафедри _____
Володимир КАПУСТЯНИК

Силабус
з навчальної дисципліни «Прикладні проблеми фізики низьких температур», що викладається в межах ОПП Прикладна фізика та наноматеріали другого (магістерського) рівня вищої освіти для здобувачів зі спеціальності 105 «Приладна фізика та наноматеріали»

Львів 2025 р.

Силабус курсу «ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ФІЗИКИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР»
2025–2026 н.р.

Назва курсу	**Прикладні проблеми фізики низьких температур**
Адреса викладання курсу	вул. Драгоманова 50, 79005 Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	фізичний факультет, кафедра фізики твердого тіла
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Е Природничі науки, математика та статистика Е6 Прикладна фізика та наноматеріали
Викладачі курсу	доцент кафедри фізики твердого тіла, к.ф.-м.н Юрій Ігорович Еліяшевський
Контактна інформація викладачів	yuriy.eliyashevskyy@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/eliyashevskyj-yurij-ihorovych
Консультації по курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту та на платформі Microsoft Teams. Для погодження часу он-лайн консультацій слід написати на електронну пошту викладача або в чат Microsoft Teams
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/prykladni-problemy-fizyky-nyz-kykh-temperatur-prykladna-fizyka-ta-nanomaterialy
Інформація про курс	Дисципліна «Прикладні проблеми фізики низьких температур» є нормативною дисципліною зі спеціальності Е6 Прикладна фізика та наноматеріали для ОПП прикладна фізика та наноматеріали для другого (магістерського) рівня вищої освіти, яка викладається в 1 семестрі в обсязі 4,5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS). Зміст та матеріал навчальної дисципліни стосується властивостей матеріалів у галузі фізики низьких температур та сучасних методів досягнення гелієвих температур, явищ, що спостерігаються у низьких та наднизьких температурах а також їх практичного використання в рамках яких можлива подальша професійна та наукова кар'єра у галузі фізики низьких температур та фізики конденсованого стану.
Коротка анотація курсу	Курс розроблено таким чином, щоб надати учасникам як теоретичні так і практичні знання, уміння, навички, загальні та фахові компетентності для розв'язання проблем в галузі фізики низьких температур. Тому у курсі представлені як огляд сучасних методів досягнення низьких та наднизьких температур так і явищ, що спостерігаються при низьких температурах з детальним оглядом теоретичних квантово-механічних підходів для їх розуміння, а також з прикладними аспектами використання низьких температур у науці та техніці.
Мета та цілі курсу	Метою вивчення нормативної дисципліни "Проблеми фізики низьких температур" є ознайомлення студентів з фізичними властивостями матеріалів як низьких так і при наднизьких температур та явищами, що спостерігаються при низьких температурах, розглядом сучасних методів отримання низьких наднизьких температур та аспектів їх використання. Поряд з цим передбачається вивчення студентами особливостей температурних вимірювань в області гелієвих температур, ознайомлення з основними положеннями теорій

	надпровідності та з можливостями практичного застосування явища надпровідності та супутніх ефектів.
Література для вивчення дисципліни	**Базова:** 1. Франів А.В. Стадник В.Й., Курляк В.Ю. Фізика низьких температур. Навчальний посібник- Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка. – 2018. –362 с. 2. Pobell F. Matter and Methods at Low Temperatures.- Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. – 2007. – 461 p. 3. Ekin J. W. Experimental techniques for low-temperatures measurements. Oxford University Press. – 2006. – 346 p. 4. Christian Enss , Siegfried Hunklinger Low-Temperature Physics Springer Berlin, Heidelberg. – 2010. – 573 p. **Допоміжна:** 1. Weisend II J.G. Handbook of cryogenic engineering.- Taylor-Francis: London. – 1998. – 600 p. 2. Франів А.В. Фізика і техніка низьких температур.- Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка. – 2008. – 168 с. 3. O. V. Lounasmaa Experimental Principles and Methods Below 1K Academic Pres London.– 1974. – 316 p. **Інформаційні ресурси:** http://www.wikipedia.org http://www.lbl.gov/abc/Contents.html#experiment www.cryogenicsociety.org https://nationalmaglab.org/
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	135 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 87 години самостійної роботи
Очікувані результати навчання	В результаті вивчення цього курсу здобувач має оволодіти такими компетентностями: **Інтегральна компетентність:** Здатність розв’язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми в сфері прикладної фізики та наноматеріалів та/або у процесі навчання, що передбачає проведення досліджень, впровадження інновацій та характеризується невизначеністю умов і вимог. **Загальні компетентності (ЗК):** ЗК 1. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності. ЗК 2. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово. ЗК 3. Здатність спілкуватися іноземною мовою. ЗК 4. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій. ЗК 5. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями. ЗК 6. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел. ЗК 7. Здатність працювати в команді.

	ЗК 8. Навички міжособистісної взаємодії. ЗК 9. Здатність працювати автономно. ЗК 10. Навики здійснення безпечної діяльності. ЗК 11. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. ЗК 12. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт. **Спеціальні (фахові) компетентності (СК):** СК 1. Здатність виконувати аналіз спеціальної літератури, формулювати постановку наукової або науково-технічної задачі, обирати методи та методики наукових досліджень та науково-технічних розробок у галузі прикладної фізики та наноматеріалів. СК 2. Здатність оптимально визначити матеріальні засоби, необхідні для проведення наукового дослідження або науково-технічної розробки (матеріали, апаратура, обладнання, обчислювальна техніка та інше). СК 3. Здатність аналізувати отримані результати, презентувати їх фахівцям у даній галузі, оформлювати наукові статті та науково-технічні звіти. СК 4. Здатність відповідно до поставленої задачі виконувати науково-технічні розробки в галузі прикладної фізики та наноматеріалів. СК 5. Здатність самостійно опановувати нову апаратуру та технології, в тому числі із суміжних галузей, для розв'язання виробничих задач. Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі **програмні результати навчання**: ПРН 1. Використовувати знання в галузі прикладної фізики та наноматеріалів, інформаційних технологій для виконання наукових досліджень та розв'язання виробничих задач. ПРН 3. Вміти обговорювати та знаходити прогресивні та інноваційні рішення проблем і завдань при здійснення професійної діяльності. ПРН 5. Ефективно працювати як індивідуально, так і в складі команди, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт у галузі прикладної фізики та наноматеріалів. ПРН 8. Вміти використовувати сучасну фізичну апаратуру та обладнання, оцінювати ризики у професійній діяльності та здійснювати запобіжні дії.
Ключові слова	Надпровідність, низькі температури, рідкий гелій, рефрижератор розчинення, надплинність, низькотемпературні вимірювання.
Формат курсу	Очний
	проведення лекцій, лабораторних робіт та консультації для кращого розуміння тем
Теми	Наведено у табл.1 і табл. 2
Підсумковий контроль, форма	іспит в кінці семестру
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти повинні знати основні закони та поняття з курсів загальної фізики, квантової механіки, фізики твердого тіла; вміти застосовувати набуті раніше знання з курсів математичного аналізу, загальної фізики, квантової механіки, термодинаміки, статистичної фізики, фізики твердого тіла володіти навиками пошуку

	та опрацювання спеціалізованої літератури, побудови та аналізу графічних залежностей.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Використовуються такі методи навчання: а) *словесні* – лекція, пояснення, бесіда, інструктаж (вступний та поточний) під час виконання лабораторних робіт; б) *наочні* – ілюстрування лекційного матеріалу презентаціями, що включають в себе таблиці, схеми та графіки; в) *лабораторні* – виконання лабораторних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань, перевірки певних наукових гіпотез на рівні досліджень, узагальнень та аналізу та формування вмінь і навичок інтерпретації результатів досліджень.
Необхідне обладнання	персональний комп'ютер, операційні системи (Windows), установка для зрідження азоту, кріокулер Гіфорда-Макганона, гелієвий та азотний кріостати, система регуляції температури «Утрекс», програмне забезпечення для обробки та візуалізації результатів вимірювань, вимірювач опору, низькотемпературні вимірювальні сенсори, посудини для зберігання кріорідин, зріджені азот та гелій, проектор
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням: • лабораторні: 40 % семестрової оцінки; максимальна кількість балів 40; • контрольні заміри (модулі): 10 % семестрової оцінки; максимальна кількість балів 10; • іспит: 50% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів 50. Підсумкова максимальна кількість балів 100. **Академічна доброчесність**: очікується, що роботи студентів будуть їхніми оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Списування, втручання в роботу інших студентів, відсутність посилань на використані джерела становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної не доброчесності. Виявлення ознак академічної не доброчесності в роботах студента є підставою для її не зарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману. **Відвідування занять** є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків визначених для виконання усіх видів робіт, передбачених курсом. **Література**: уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно буде надана викладачем виключно в освітніх цілях без права передачі її третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих. **Політика встановлення балів**. Враховуються бали набрані за виконання та захист лабораторних робіт і самостійної роботи. При цьому враховується присутність на заняттях та активність студента під час виконання лабораторної роботи; списування та плагіат; користування мобільними пристроями в цілях не пов'язаних з навчанням; несвоєчасне виконання поставленого завдання.

	Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.
Питання до екзамену	1. Використання низьких температур в науці та техніці. 2. Основи вакуумної фізики. Критерій Кнудсена. Основне рівняння вакуумної техніки. 3. Методи отримання вакууму. Типи вакуумних насосів. Загальна характеристика. 4. Вакуумні насоси об'ємної дії. 5. Принцип дії турбомолекулярних насосів. Приклади турбомолекулярних насосів та їх характеристики. 6. Характеристики пароструминних насосів. Дифузійні та ежекційні насоси. 7. Фізико-хімічні методи отримання вакууму. 8. Методи вимірювання вакууму. Вакуумні перетворювачі. 9. Зберігання та транспортування кріорідин. Трансфер рідкого гелію. 10. Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз гелію ^{4}He. Фазова діаграма. 11. Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз гелію ^{3}He. Фазова діаграма. 12. Гелієві кріостати з температурою вищою 4,2 К. Переваги та недоліки. 13. Відкачувальні гелієві кріостати з діапазоном температур 1,3 К - 4,2 К. 14. Гелієві кріостати на основі ізотопу ^{3}He з зовнішнім насосом відкачування. 15. Гелієві кріостати на основі ізотопу ^{3}He з абсорбційним відкачування. Переваги та недоліки. 16. Теоретичні реверсивні цикли. Цикл Карно. Коєфіцієнт корисної дії циклу Карно. 17. Модифіковані цикли Карно. Цикл Стірлінга. 18. Кріокулер на основі пульсацій них трубок. 19. Ефект Джоуля-Томсона. Холодильна машина на основі ефекту Джоуля-Томсона. 20. Властивості суміші ізотопів ^{3}He - ^{4}He. Фазова діаграма. 21. Процес розчинення у ^{3}He - ^{4}He рефрижераторі. Порівняння з кріостатом на основі ізотопу 3He. 22. Реалізація ^{3}He - ^{4}He рефрижератора. Властивості основних компонентів рефрижератора. 23. Рефрижерація за допомогою твердого ^{3}He. Метод Померанчука. Принципова схема кріостату. Переваги та недоліки методу. 24. Охолодження на основі адіабатичної демагнетизації парамагнітних солей. Схема кріостату. Переваги та недоліки методу. 25. Мікрокельвіновий діапазон температур. Рефрижератори на

	основі ядерної адіабатичної демагнетизації. Принципова схема кріостату. 26. Термодинамічна шкала температур. Первинні термометри. 27. Вторинні термометри. Вимоги до вторинних термометрів. 28. Опорові та ємнісні термометри. 29. Термоелектричні сенсори – термопари. Особливості вимірювань у низьких температурах. 30. Явище надпровідності. Надпровідники першого до другого роду 31. Ефект Мейснера. Рівняння Лондонів. 32. Основні положення теорії надпровідності Бардіна-Купера-Шрифера. 33. Ефект Джозефсона. Принцип дії квантового інтерферометра. 34. Теплоємність при низьких температурах. Закон дюлонга-Пті. 35. Модель теплоємності Ейнштейна. Теорія Дебая. 36. Теплопровідність при низьких температурах. Закон Відемана-Франца.
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «**Комп'ютерні методи моделювання структур та фізичних властивостей**»

Тиждень	Тема	Форма діяльності та обсяг годин	Література	Термін виконання
1,2	**Вступ** Використання низьких температур в науці та техніці. Історія становлення фізики низьких температур. **Тема 1. Вступ до кріогенної техніки.** Зберігання та транспортування кріорідин. Термодинамічні основи процесу охолодження. Низькотемпературні процеси і цикли, та їх використання для отримання низьких температур. Кріогенні газові машини. Типи кріостатів для отримання низьких температур їх перевагт та недоліки. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Газопротічні та рідиннопротічні кріостати.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2; Допоміжна: 1, 2	2 тижні
3,4	**Тема 2. Гелієві кріостати на основі ізотопів He^3 та He^4** Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз стабільних гелієвих ізотопів. Фазові діаграми He^3 та He^4. Явище надплинності та надтеплопровідності гелію. Гелієві кріостати з температурою вищою 5 К Гелієві кріостати з діапазоном температур 1,3 К - 4,2 К. Гелієві кріостати на основі ізотопу He^3 із зовнішнім та внутрішнім відкачуванням. Перехід до наднизьких температур. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Методи термічної ізоляції у низьких температурах.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 6 год	Базова: 2, 3, 4; Допоміжна: 1, 3	2 тижні
5,6	**Тема 3. Кріокулери – охолоджувальні машини замкнутого циклу.** Теоретичні реверсивні цикли. Зворотній цикл Карно. Методи його модифікації. Кріокулери на основі циклу Гіффорда-МакМагона. Кріокулери на основі циклу Стірлінга. Ефект Джоуля-Томсона	Лекції – 2 год, самостійна робота – 6 год	Базова: 1,2;3 Допоміжна: 2,3	2 тижні

	та його використання для отримання низьких температур. Паразитичні втрати та ефективність охолоджувальних машин замкнутого циклу. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Використання кріокулерів в науці та промисловості.			
7,8,9	**Тема 4. Наднизькі температури та методи їх отримання.** Мілікельвіновий діапазон, його використання в науці та ІТ-галузі. Прототипи квантових комп'ютерів. Властивості суміші ізотопів гелію He^3-He^4. Фазова діаграма. Процес розчинення ізотопів гелію і реалізація рефрижератора на основі суміші He^3-He^4. Властивості основних компонентів He^3-He4 рефрижератора. Ефект Померанчука. Охолодження за допомогою переходу в твердотільну фазу для гелію He^3. Рефрижератори на основі адіабатичної демагнетизації парамагнітних солей. Мікрокельвіновий діапазон. Адіабатична демагнетизація ядер міді. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Теплообмінювальні властивості гелію	Лекції – 3 год, самостійна робота – 8 год	Базова: 1, 2; Допоміжна: 6	3 тижні
10,11	**Тема 5. Явище надпровідності. Високотемпературні надпровідники.** Явище надпровідності. Перспективи використання матеріалів з надпровідними властивостями в науці та техніці. Надпровідники першого та другого роду. Високотемпературні надпровідники. Ефект квантової левітації (ефект Мейснера). Рівняння Лондонів. Основні положення теорії Бардіна-Купера-Шифера. Ефект Джозефсона. Квантові інтерферометри. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Використання надпровідників у	Лекції – 2 год, самостійна робота – 6 год	Базова: 1, 3;4 Допоміжна: 2	2 тижні

	промисловості, енергетиці та медицині.			
12,13,14	**Тема 6. Властивості твердих тіл при низьких температурах.** Теплоємність діелектриків, металів, надпровідних металів та аморфних твердих тіл. Закон Дюлонга-Пті Теорія Дебая. Теорія Ейнштейна. Термічна провідність. Граткова провідність, фонони. Електронна термічна провідність. Термічна провідність при наднизьких температурах. Зв'язок між електричною та термічною провідностями. Закон Відемана-Франца. Вплив домішок. Термічний контакт та термічна ізоляція. Термічні перемикачі. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Низькотемпературні методи вимірювання теплоємності.	Лекції – 3 год, самостійна робота – 8 год	Базова 1, 4 Допоміжна: 2	3 тижні
15,16	**Тема 7. Низькотемпературна термометрія** Особливості температурних вимірювань нижче 10 К. Температурна шкала і реперні точки для вимірювання температури. Первинні та вторинні термометри Газові термометри. Термоелектричні сенсори. Резистивні термометри. Шумова термометрія. Діелектричні методи вимірювання температури. Магнітна термометрія. **С.Р.** Вивчення матеріалу лекції. Напівпровідникові опорові термометри для низьких температур.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 6 год	Базова: 2, 3, 4 Допоміжна: 1	2 тижні

Таблиця 2

Теми лабораторних занять

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1	Вивчення методів зберігання та переливання кріорідин.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 3 год	1 тиждень
2,3	Отримання низьких температур методом відкачування парів рідкого холодоагенту	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
4,5	Вивчення роботи гелієвого кріостату Та низькотемпературної системи «Утрекс К43»	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
6,7	Вивчення будови і принципів роботи кріокулера закритого типу Advanced Research System	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
8	Охолодження і зрідження кріогенних газів з використанням циклу Карно	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 3 год	1 тиждень
9	Розділення кріогенних газів на основі використання процесу розділення зрідженого повітря.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 3 год	1 тиждень
10,11	Калібрування вторинних температурних сенсорів в області низьких температур	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
12,13	Дослідження сегнетоелектричного фазового переходу в області низьких температур	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
14,15	Вивчення роботи станції для отримання рідкого гелію КГУ-150/4,5	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 3 год	2 тижні
16	Вивчення роботи кріостату занурювального типу та азотної термокомірки.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 3 год	1 тиждень