

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 25 серпня 2023 р.)

Завідувач кафедри 

Володимир КАПУСТЯНИК

Силабус

з навчальної дисципліни «Фізика низьких температур»,
що викладається в межах
ОПП Нанофізика та наноматеріали
ОПП Комп'ютерні технології у прикладній фізиці
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 105 «Приладна фізика та наноматеріали»

Львів 2023

Назва дисципліни	Фізика низьких температур
Адреса викладання дисципліни	вул. Драгоманова 50, 79005 Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	фізичний факультет, кафедра фізики твердого тіла
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Галузь знань - 10 Природничі науки Спеціальність - 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Викладачі дисципліни	Лектор: Еліяшевський Юрій Ігорович доцент кафедри фізики твердого тіла, к.ф.-м.н. лабораторні заняття проводить лектор.
Контактна інформація викладачів	yuriy.eliyashevskyy@lnu.edu.ua
Консультації по дисципліні 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.
Сторінка дисципліни	https://physics.lnu.edu.ua/course/fizyka-nyzkyh-temperatur-ptykladna-fizyka
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Фізика низьких температур» є нормативною дисципліною зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали яка викладається в VII семестрі в обсязі 3,0 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Дисципліну 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 дисципліни	Метою вивчення нормативної дисципліни “Фізика низьких температур” є ознайомлення студентів з фізичними явищами як низьких так і при наднизьких температур та розглядом сучасних методів отримання низьких наднизьких температур та аспектів їх використання, а також основ вакуумної техніки. Поряд з цим передбачається вивчення студентами особливостей температурних вимірювань в області гелієвих температур, ознайомлення з основними положеннями теорії надпровідності та з можливостями практичного застосування явища надпровідності та супутніх ефектів.
Література для вивчення дисципліни	Базова: <ol style="list-style-type: none"> 1. Pobell F. Matter and Methods at Low Temperatures.- Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. – 2007. – 461 p. 2. Франів А.В. Стадник В.Й., Курляк В.Ю. Фізика низьких температур. Навчальний посібник - Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка. – 2018. –362 с. 3. Митропольський І.Є., Грицак Р.В. Вакуумна техніка: Навчальний посібник- Ужгород. Видавництво УжНУ «Говерла». – 2018. – 138 с. 4. Ekin J. W. Experimental techniques for low-temperatures measurements. Oxford University Press. – 2006. – 346 p. 5. Christian Enss , Siegfried Hunklinger Low-Temperature Physics Springer Berlin, Heidelberg. – 2010. – 573 p.

	<p>Допоміжна:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Франів А.В. Фізика і техніка низьких температур.- Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка. – 2008. – 168 с. 2. Weisend П J.G. Handbook of cryogenic engineering.- Taylor-Francis: London. – 1998. – 600 p. 3. O. V. Lounasmaa Experimental Principles and Methods Below 1K Academic Pres London.– 1974. – 316 p. <p>Інформаційні ресурси:</p> <p>http://www.wikipedia.org http://www.lbl.gov/abc/Contents.html#experiment http://www.cryogenicsociety.org/ https://nationalmaglab.org/</p>
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	90 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 годин лабораторних занять, та 58 години самостійної роботи
Очікувані результати навчання	<p>В результаті вивчення цього курсу здобувач має знати:</p> <ul style="list-style-type: none"> – основні теоретичні питання, викладені в лекційному курсі; – мати уяву про сучасний стан знань в сфері новітніх досягнень в галузі низькотемпературної фізики, властивостей тіл при низьких та наднизьких температурах. Орієнтуватися у можливостях практичного застосування досягнень низькотемпературної фізики у техніці. <p>вміти:</p> <ul style="list-style-type: none"> – використовувати отримані знання при низькотемпературних дослідженнях фізичних властивостей твердих тіл, температурних вимірюваннях. – обслуговувати установки для отримання низьких температур, здійснювати модернізацію та вдосконалення існуючих установок.
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	Залік
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	<p>Використовуються такі методи навчання:</p> <ol style="list-style-type: none"> а) <i>словесні</i> – лекція, пояснення, бесіда, інструктаж (вступний та поточний) під час виконання лабораторних робіт; б) <i>наочні</i> – ілюстрування лекційного матеріалу презентаціями, що включають в себе таблиці, схеми та графіки; в) <i>лабораторні</i> – 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.

<p>Необхідне обладнання</p>	<p>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, ємності для зберігання кріорідин, зріджені азот та гелій, проектор</p>
<p>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</p>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • лабораторні: 50 % семестрової оцінки, з них: 6 лабораторних робіт по 6 балів (1-6 лабораторна робота) 2 лабораторні роботи по 7 балів (7,8 лабораторна робота) максимальна кількість балів 50; • контрольні заміри (модулі) теоретичного матеріалу: 50 % семестрової оцінки; максимальна кількість балів 50, з них: контрольна робота в середині семестру – 20 балів, підсумкова контрольна робота за лекційним матеріалом – 30 балів ; <p>Підсумкова максимальна кількість балів 100.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>Додаткові бали можна отримати за результатами неформального та/або інформального навчання по тематиці даного курсу. Визнання та зарахування результатів такого навчання відбувається у відповідності до наданих документів про неформальне та/або інформальне навчання.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Питання для перевірки теоретичного матеріалу курсу</p>	<ol style="list-style-type: none"> 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.

	<ol style="list-style-type: none"> 6. Характеристики парострумінних 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 ^4He. Фазова діаграма. 11. Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз гелію ^3He. 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 ^3He з зовнішнім насосом відкачування. 15. Гелієві кріостати на основі ізотопу ^3He з абсорбційним відкачування. Переваги та недоліки. 16. Теоретичні реверсивні цикли. Цикл Карно. Коефіцієнт корисної дії циклу Карно. 17. Модифіковані цикли Карно. Цикл Стірлінга. 18. Кріокулер на основі пульсаційних трубок. 19. Ефект Джоуля-Томсона. Холодильна машина на основі ефекту Джоуля-Томсона. 20. Властивості суміші ізотопів ^3He - ^4He. Фазова діаграма. 21. Процес розчинення у ^3He - ^4He рефрижераторі. Порівняння з кріостатом на основі ізотопу ^3He. 22. Реалізація ^3He - ^4He рефрижератора. Властивості основних компонентів рефрижератора. 23. Рефрижерація за допомогою твердого ^3He. 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-Шриффера. 33. Ефект Джозефсона. Принцип дії квантового інтерферометра.
<p>Опитування</p>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

Схема курсу «Фізика низьких температур»

Тиж-день	Тема	Форма діяльності та обсяг годин	Література	Термін виконання
1,2	<p>Вступ Використання низьких температур в науці та техніці. Історія становлення фізики низьких температур.</p> <p>Тема 1. Вступ до вакуумної техніки. Методи теплоізоляції під час роботи з низькими температурами. Вакуумна техніка. Методи отримання вакууму, типи вакуумних насосів. Насоси об'ємної дії та молекулярні насоси. Методи вимірювання вакууму та вакуумні перетворювачі. Ущільнення та контроль якості вакуумних з'єднань.</p> <p>С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Вакуумні кріонасоси та їх використання у фізиці низьких температур.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 3; Допоміжна: 2	2 тижні
3,4	<p>Тема 2. Основи 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 переваг та недоліки.</p> <p>С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Газопротічні та імерсійні кріостати.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2; Допоміжна: 1, 2	2 тижні
5,6	<p>Тема 2. Гелієві кріостати на основі ізотопів He^3 та He^4 Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз гелієвих ізотопів He^3 та He^4. 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.</p> <p>С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Методи термоізоляції.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2, 4; Допоміжна: 1, 3	2 тижні
7,8	<p>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 та його використання для отримання низьких температур. Паразитичні втрати та ефективність охолоджувальних машин замкнутого циклу.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1,2;4 Допоміжна: 2,3	2 тижні

	<p>С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Використання кріокулерів в науці та промисловості.</p>			
9,10	<p>Тема 4. Наднизькі температури та методи їх отримання. Рефрижератори на основі адіабатичної демагнетизації парамагнітних солей. Мілікельвіновий діапазон, його використання в науці та техніці. Ефект Померанчука. Охолодження за допомогою переходу в твердотільну фазу для гелію He^3. Мікрокельвіновий діапазон. Адіабатична демагнетизація ядер міді. С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Теплообмінювальні властивості гелію</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2,4,5; Допоміжна: 3	2 тижні
11,12	<p>Тема 5 Наднизькі температури. Рефрижератор розчинення He^3-He^4. Властивості суміші ізотопів гелію He^3-He^4. Фазова діаграма. Процес розчинення ізотопів гелію. Реалізація рефрижератора на основі суміші He^3-He^4. Теплообмінники у рефрижераторі розчинення. Властивості основних компонентів He^3-He^4 рефрижератора. Напрямки застосування рефрижератора розчинення. С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Порівняльна характеристика рефрижератора розчинення He^3-He^4 та відкачувального гелієвого кріостату He^3.</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2,4,5; Допоміжна: 3	2 тижні
12,13	<p>Тема 6. 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 промисловості, енергетиці та медицині.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 3;4 Допоміжна: 2	2 тижні
13,14	<p>Тема 7 Температурні шкали та фіксовані температурні точки. Особливості температурних вимірювань у гелієвих температурах Термодинамічна температурна шкала. Реперні температурні точки. Міжнародні температурні шкали. Сучасні стандарти низькотемпературних вимірювань С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Температурна шкала PLTS-2000.</p>	Лекції – 3 год, самостійна робота – 2 год	Базова 1, 4, 5 Допоміжна: 2,3	2 тижні
15,16	<p>Тема 8. Низькотемпературна термометрія Первинні та вторинні термометри.</p>	Лекції – 2 год, самостійна	Базова: 1, 2, 4, 5	2 тижні

	<p>Вимоги до вторинних термометрів. Газові термометри. Термоелектричні сенсори. Резистивні термометри. Шумова термометрія. Діелектричні методи вимірювання температури. Магнітна термометрія. С.Р. Вивчення матеріалу лекції. Напівпровідникові опорні термометри для низьких температур.</p>	робота – 2 год	Допоміжна: 1	
--	---	----------------	-----------------	--

Таблиця 2

Теми лабораторних занять

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1,2	Вивчення техніки отримання високого вакууму. Методи вимірювання вакууму.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
3,4	Отримання низьких температур методом відкачування парів рідкого холодоагенту	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
5,6	Вивчення роботи гелієвого кріостату та низькотемпературної системи «Утрекс К43»	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 5 год	2 тижні
7,8	Вивчення будови і принципів роботи кріокулера закритого типу Advanced research system	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
9,10	Охолодження і зрідження кріогенних газів з використанням циклу Карно	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 5 год	2 тижні
11,12	Розділення кріогенних газів на основі використання процесу розділення зрідженого повітря.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
13,14	Калібрування вторинних температурних сенсорів в області низьких температур	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні
15,16	Вивчення роботи кріостату занурювального типу та азотної термокомірки.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 6 год	2 тижні