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

Затверджено
На засіданні кафедри фізики металів
фізичного факультету
Львівського національного університету
імені Івана Франка
(протокол № 9 від 29.08.2025 р.)

Завідувач кафедри проф. Мудрий С. І.

Силабус
з навчальної дисципліни «Молекулярна фізика», що викладається в межах ОПП «Квантові комп'ютери та квантове програмування» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти для здобувачів з спеціальності Е5 Фізика та астрономія

Львів 2025

Назва дисципліни	Молекулярна фізика
Адреса викладання дисципліни	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005, м. Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	Фізичний факультет, кафедра фізики металів
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Галузь знань – Е Природничі науки, математика та статистика Спеціальність – Е5 Фізика та астрономія
Викладачі дисципліни	Лектор: Якібчук Петро Миколайович, професор кафедри фізики металів, доктор фізико-математичних наук. Практичні заняття проводить: Королишин Андрій Володимирович, доцент кафедри фізики металів, кандидат фізико-математичних наук
Контактна інформація викладачів	petro.yakibchuk@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/yakibchuk andriy.korolyshyn@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/andrij-korolyshyn
Консультації по дисципліні відбуваються	Консультації в день проведення лекцій/практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації. Для погодження часу он-лайн консультацій слід писати на електронну пошту викладача.
Сторінка дисципліни	https://physics.lnu.edu.ua/course/molekuliarna-fizyka-kvantovi-kompiutery-ta-kvantove-prohramuvannia
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Молекулярна фізика» є нормативною навчальною дисципліною зі спеціальності – Е5 Фізика та астрономія для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, яка викладається в 1 семестрі в обсязі 3,0 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб надати учасникам відповідні теоретичні знання, уміння, навички, загальні та фахові компетентності для продукування нових ідей, розв'язання комплексних проблем у галузі молекулярної фізики. Тому в курсі представлені відповідні теоретичні дані та передбачене розв'язання практичних задач.
Мета та цілі дисципліни	Метою є одержання студентами знань з розділу "Молекулярна фізика" загального курсу фізики, вивчення фізичних властивостей речовин (газів, рідин, твердих тіл) залежно від їхньої внутрішньої будови та зовнішніх впливів (тиску, температури, електричних та магнітних полів). Завданням курсу є формування в студентів знань та умінь, необхідних для розуміння явищ перенесення (дифузія, теплопровідність, внутрішнє тертя) у різних агрегатних станах речовин за їхньою молекулярною будовою та характером молекулярного руху; процесів фазових переходів (кристалізація і плавлення, випаровування і конденсація), критичний стан речовини, поверхневі явища на межі розділу. Здобуті знання з молекулярної фізики створюють фундамент для більш глибокого засвоєння матеріалів інших розділів фізики на атомно-молекулярному рівні. Навчити студентів самостійно виконувати розрахунки, необхідні для розв'язування задач молекулярної фізики та термодинаміки.
Література для вивчення дисципліни	Основна література: 1. Якібчук П.М. Молекулярна фізика. Підручник. / П.Якібчук, М.Клим – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2015. –584 с.

	2. Клим М.М. Молекулярна фізика. Підручник. / М.Клим, П.Якібчук – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003, -546с. 3. Дутчак Я.Й. Молекулярна фізика./ Я.Дутчак, П.М.Якібчук. – Київ: НМК ВО, 1991, -340с. 4. Булавін Л.А. Молекулярна фізика. / Л.Булавін, Д.Гаврюшенко, В.Сисоєвю – Київ:Знання, 2006. -567с. 5. Клим М.М. Збірник задач з молекулярної фізики. Навчальний посібник. / М.Клим, П.Якібчук – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2009. –242с. (гриф МОН України) 6. Клим М.М. Збірник задач з молекулярної фізики. Навч. посібник. / М.Клим, М.Комарницький, С.Мудрий – Київ: УМК ВО, 1990.-172с. 7. Гаркуша І.П. Загальний курс фізики. Збірник задач: навч. посіб./ І.Гаркуша, І.Горбачук [та ін.]; за ред. І.Гаркуші. – Київ: В-во "Техніка", 2003. – 560 с. – ISBN 966-575-130-1. **Допоміжна:** 1. Воловик П.М. Курс фізики для університетів: навч. посіб. / П.М. Воловик – К. : Ірпінь, Перун, 2005. – 864 с. – ISBN 966-569-172-4. **Інформаційні ресурси:** 1. http://www.nbuv.gov.ua/ – Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського. 2. http://www.lsl.lviv.ua/ - Львівська національна наукова Бібліотека України імені В. Стефаника 3. https://lnulibrary.lviv.ua/ - Наукова бібліотека Львівського національного університету імені Івана Франка
Обсяг курсу	90 годин, з яких 48 годин аудиторних занять (з них 16 годин лекцій, 32 години практичних занять) та 42 годин самостійної роботи
Очікувані результати навчання	В результаті вивчення даного курсу студенти повинні **знати**: 1. основні ідеї, поняття та закони молекулярної фізики та термодинаміки, межі їхнього застосування, 2. закони ідеальних газів; перший і другий принцип термодинаміки; основи молекулярно-кінетичної теорії речовин; основні положення статистичної фізики; процеси переносу; реальні гази; основи фізики поверхневих явищ; фази і фазові перетворення; основи фізики розчинів; елементи симетрії і будова кристалів; 3. основні фізичні величини, які характеризують стан речовини, одиниці їхнього вимірювання; фундаментальні поняття; 4. головні технічні проблеми, пов'язані з використанням теплових явищ. **вміти**: 1. застосовувати вивчені закони і принципи для розв'язування задач з молекулярної фізики та термодинаміки; 2. застосовувати здобуті знання на практиці, зокрема під час фізичного експерименту; 3. пояснювати теплові процеси та явища, які використовуються у техніці та побуті; 4. визначати принципи дії та область застосування фізичних методів та приладів, робота яких ґрунтується на теплових явищах.
Ключові слова	Ідеальний газ, термодинаміка, тиск, температура, політропний процес, розподіл Максвела, розподіл Больцмана, реальний газ, рідини, тверді тіла, фазові переходи.

Формат курсу	Очний
	Проведення лекцій, практичних занять та консультації для кращого розуміння тем
Теми	Наведено у таблиці 1
Підсумковий контроль, форма	Поточний контроль: усне та письмове опитування, модульні тести, оцінка практичних завдань Підсумковий контроль: іспит в кінці семестру. Форма: Письмово-усна.
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти повинні знати основні закони та поняття з курсів загальної фізики, механіки; вміти застосовувати набуті раніше знання з курсів математичного аналізу, диференційних рівнянь та комп'ютерних технологій для розв'язку практичних завдань; володіти навиками пошуку та опрацювання спеціалізованої літератури, розв'язку алгебраїчних і диференційних рівнянь, 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; б) *наочні* – ілюстрування лекційного матеріалу таблицями, схемами та графіками; в) *практичні* – виконання практичних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань.
Необхідне обладнання	Обладнання навчальної лабораторій з курсу «Молекулярна фізика» персональний комп'ютер, операційні системи (Windows, Linux), загальновживані комп'ютерні програми, проектор та екран.
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням: • практичні: 20% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 20 • контрольні заміри (модулі): 30% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 30 • іспит: 50% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів 50 Підсумкова максимальна кількість балів 100. **Академічна доброчесність** здобувачами вищої освіти передбачає самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання. Списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій чи усній роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів обману. **Відвідання занять** є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і практичні 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**. Усю література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих. **Політика виставлення балів**. Враховуються бали, набрані на практичних та поточному тестуванні. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнень на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими

	мобільними пристроями під час заняття в цілях, не пов'язаних із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін. Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.
Питання до екзамену	1. Предмет молекулярної фізики. Модель матеріального тіла. Методи вивчення макроскопічних систем. Маси атомів і молекул. Кількість речовини. 2. Модель ідеального газу. Основне рівняння кінетичної теорії газів. Рівняння стану ідеального газу. Закони ідеального газу. 3. Вимірювання температури. Термометричне тіло і термометрична величина. Термометри. Емпіричні шкали температур. 4. Число ступенів вільності. Теорема про розподіл енергії за ступенями вільності молекул. Внутрішня енергія. 5. Перше начало термодинаміки. Внутрішня енергія. Робота. Теплота. Перше начало термодинаміки. Термодинамічна система. Термодинамічні параметри стану системи. Класифікація термодинамічних параметрів. 6. Теплоємність. Теплоємність за сталого об'єму. Теплоємність за сталого тиску для ідеального газу. Якісне пояснення залежності теплоємності молекулярного водню від температури. 7. Політропний процес. Рівняння політропи. Робота при політропному процесі. 8. Адіабатичний процес. Рівняння Пуассона. 9. Друге начало термодинаміки. Формулювання Томсона другого начала термодинаміки. Формулювання Клазіуса. 10. Формулювання другого начала термодинаміки з допомогою ентропії. Фізичний зміст ентропії. 11. Теплова машина. Холодильна машина. Колові процеси (цикли). Робота циклу. Коефіцієнт корисної дії циклу. 12. Цикл Карно. Коефіцієнт корисної дії циклу Карно. Теорема Карно. 13. Нерівність Клаузіуса. Визначення ентропії ідеального газу. Обчислення зміни ентропії в процесах ідеального газу. 14. Ентропія і термодинамічна імовірність. Формула Больцмана. Статистичний характер другого начала термодинаміки. 15. Трете начало термодинаміки. Теплова теорема Нернста. Постулат Планка. Формулювання третього начала термодинаміки. 16. Розподіл молекул ідеального газу за швидкостями. (розподіл Максвела). Характерні швидкості розподілу Максвелла. Експериментальна перевірка розподілу Максвелла. 17. Частота ударів молекул об стінку. Розподіл молекул за кінетичною енергією. 18. Розподіл Больцмана. Експериментальна перевірка розподілу Больцмана. 19. Співвідношення між розподілами Максвелла і Больцмана. Розподіл Максвелла-Больцмана. 20. Броунівський рух. Розрахунок руху, броунівської частинки. Обертовий Броунівський рух. Експериментальне визначення сталої Больцмана. Досліди Перрена. 21. Кінематичні характеристики молекулярного руху. Зіткнення молекул. Частота зіткнень. Середня довжина вільного пробігу. Газокінетичний діаметр молекул. Поперечний переріз. 22. Процеси перенесення в газах. Зв'язок між коефіцієнтами процесів перенесення в газах. 23. Дифузія в газі. Коефіцієнт самодифузії. Закон Фіка. 24. Теплопровідність в газі. Коефіцієнт теплопровідності. 25. В'язкість газів. Коефіцієнт динамічної в'язкості.

	26. Реальні гази. Відхилення властивостей газів від ідеальності. Сили міжмолекулярної взаємодії в реальних газах. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Фізичний зміст сталих “а” і “в” в рівнянні Ван-дер-Ваальса. 27. Область двофазних станів. Критичний стан речовини. Критична опалесценція. 28. Зведене рівняння Ван-дер-Ваальса. 29. Ізотерми реального газу. Перехід з газоподібного в рідкий. Експериментальні ізотерми. 30. Внутрішня енергія реального газу. 31. Явище Джоуля-Томсона. Фізичний зміст явища. 32. Диференціальний та інтегральний ефект Джоуля-Томсона. Температура інверсії. 33. Рідини. Молекулярно-кінетична характеристика рідкого стану. Ближній порядок в рідинах. 34. В'язкість рідин. Температурна залежність коефіцієнту динамічної в’язкості рідин. 35. Дифузія в рідинах. 36. Поверхневий натяг рідин. Вільна поверхнева енергія. Коефіцієнт поверхневого натягу. 37. Змочування і незмочування. Кривизна поверхні і додатковий тиск. Формула Лапласа. Капілярні явища. 38. Рідкі розчини. Їх характеристики. Розчинність. Теплота розчинення. Ідеальні розчини. 39. Осмотичний тиск. Механізм його виникнення. Закономірності осмотичного тиску. Закон Вант-Гоффа. 40. Закон Рауля. Закон Генрі. 41. Симетрія кристалів. Кристалографічні системи. Кристалічна гратка. Реальні кристали. Дефекти в кристалах. Дислокації. 42. Теплоємність твердих тіл. Правило Дюлонга і Пті. Квантові теорії теплоємності твердих тіл. 43. Фазові переходи. Типи фазових переходів. Фазові переходи I і II роду. Кількісний опис фазових переходів I роду. 44. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса. Фазові діаграми. 45. Теплоємність твердих тіл. Правило Дюлонга і Пті. Квантові теорії теплоємності твердих тіл.
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Молекулярна фізика»

Тижні	Тема занять	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1-2	Тема 1. Вступ. Предмет молекулярної фізики. Модель матеріального тіла. Маси атомів і молекул. Кількість речовини. Агрегатні стани речовини. Модель ідеального газу. Динамічний, статистичний і термодинамічний методи опису речовини. Тиск і температура. Основне рівняння кінетичної теорії газів. Рівняння стану ідеальних газів. Закон Бойля-Маріотта. Середня кінетична енергія та температура.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 5 год.	2 тижні
3-4	Тема 2. Перший закон термодинаміки. Задачі термодинаміки. Термодинамічна система. Термодинамічні параметри стану системи. Термічне рівняння стану. Число ступенів вільності. Теорема про розподіл енергії за ступенями вільності. Внутрішня енергія. Функції стану і повні диференціали. Робота. Теплота. Перший закон термодинаміки. Теплоємність ідеального газу. Політропний процес. Рівняння політропи. Адіабатний процес. Рівняння Пуассона. Ізопроцеси в ідеальних газах. Робота при політропному процесі.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 6 год.	2 тижні
5-6	Тема 3. Другий закон термодинаміки. Еквівалентність формулювань Томсона і Клаузіуса другого закону термодинаміки. Теплова машина. Холодильна машина. Коефіцієнти корисної дії теплової і холодильної машини. Циклічні процеси. Робота циклу. Коефіцієнт корисної дії. Цикл Карно. Теореми Карно. Нерівність Клаузіуса. Визначення ентропії ідеального газу. Обчислення зміни ентропії в процесах ідеального газу. Фізичний зміст ентропії. Ентропія і термодинамічна імовірність. Формула Больцмана. Третій закон термодинаміки. Теплова теорема Нернста. Постулат Планка. Формулювання третього закону термодинаміки. Властивості речовин при температурі 0К.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 5 год.	2 тижні
7-8	Тема 4. Розподіл Максвела. Розподіл молекул за швидкостями. Середня кінетична енергія молекул. Характерні швидкості розподілу Максвела. Експериментальна перевірка розподілу Максвела. Розподіл Больцмана. Незалежність температури від зовнішнього потенціального поля. Експериментальна перевірка розподілу Больцмана. Барометрична формула. Атмосфера планет. Співвідношення між розподілами Максвелла і Больцмана. Розподіл Максвелла-Больцмана.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 5 год.	2 тижні
9-10	Тема 5. Броунівський рух. Розрахунок руху броунівської частинки. Обертовий броунівський рух. Експериментальне визначення сталої Больцмана. Досліди Перрена. Кінематичні характеристики молекулярного руху. Газокінетичний діаметр молекул. Середня довжина вільного пробігу. Частота зіткнень.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 5 год.	2 тижні

	Вакуум. Методи отримання та вимірювання вакууму. Процеси переносу в газах. Дифузія. Коефіцієнт самодифузії. Стаціонарна дифузія. Нестаціонарна дифузія. Закон Фіка. Взаємна дифузія в газовій суміші. Теплопровідність. Коефіцієнт теплопровідності. Стаціонарна і нестаціонарна теплопровідність. Час релаксації для температури. В'язкість газів. Коефіцієнт динамічної в'язкості. Зв'язок між коефіцієнтами процесів переносу в газах.		
11-12	Тема 6. Реальні гази. Відхилення властивостей газів від ідеальності. Ізотерми Амага. Температура Бойля. Сили міжмолекулярної взаємодії в реальних газах. Потенціал міжмолекулярної взаємодії. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Перехід з газоподібного стану в рідкий. Експериментальні ізотерми. Область двофазних станів. Насичена пара. Правило важеля. Критичний стан речовини. Зведене рівняння Ван-дер-Ваальса. Внутрішня енергія реального газу. Теплоємності $C`_V$ і $C`p$ реальних газів. Рівняння політропи реального газу. Явище Джоуля-Томсона. Фізичний зміст явища. Диференціальний та інтегральний ефект Джоуля-Томсона. Температура інверсії. Зрідження газів. Методи охолодження газів. Магнітний метод отримання низьких температур.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 5 год.	2 тижні
13-14	Тема 7. Рідини. Ближній порядок в рідинах. Молекулярно-кінетична характеристика рідкого стану. В'язкість рідин. Температурна залежність коефіцієнту динамічної в'язкості рідин. Дифузія в рідинах. Поверхневий натяг рідин. Вільна поверхнева енергія. Коефіцієнт поверхневого натягу. Умова рівноваги на межі двох рідин і на межі рідина-тверде тіло. Змочування і незмочування. Кривизна поверхні і додатковий тиск. Формула Лапласа. Капілярні явища. Випаровування та кипіння рідин. Теплота випаровування. Тиск насиченої пари поблизу викривленої поверхні рідини. Перегріта рідина. Бульбашкова камера. Переохолоджена пара. Камера Вільсона. Рідкі розчини. Їх кількісні характеристики. Розчинність. Теплота розчинення. Ідеальні розчини. Закон Рауля. Закон Генрі. Осмотичний тиск. Механізм його виникнення. Закономірності ос-мотичного тиску. Закон Вант-Гоффа.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 6 год.	2 тижні
15-16	Тема 8. Тверді тіла. Класифікація твердих тіл. Кристалічні та аморфні тіла. Симетрія кристалів. Елементи симетрії. Кристалографічні системи. Кристалічна гратка. Індекси атомних площин і кристалографічних напрямків. Реальні кристали. Дефекти в кристалах. Дислокації. Механічні властивості твердих тіл. Пружня деформація. Закон Гука. Види пружньої деформації. Коефіцієнт Пуассона. Зв'язок між модулями пружності. Пластична деформація. Текучість. Механізм пластичної деформації. Фазові переходи. Типи фазових переходів. Фазові переходи I і II роду. Кількісний опис фазових переходів I роду. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса. Поліморфні перетворення. Фазові діаграми.	Лекція – 2 год. Практичні – 4 год. Самост. робота – 5 год.	2 тижні