

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Затверджено
на засіданні приймальної комісії
Львівського національного університету
імені Івана Франка
19.04.2024 р. (протокол № 3)

Ректор  Володимир МЕЛЬНИК



ПРОГРАМА

фахового вступного випробування
для здобуття освітнього ступеня магістра

Спеціальності – 104 «Фізика та астрономія»,
105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Освітні програми – «Теоретична фізика та астрофізика (освітньо-наукова)», «Експериментальна фізика (освітньо-наукова)»,
«Квантові комп'ютери та квантове програмування (освітньо-наукова)»
«Прикладна фізика та наноматеріали»

Львів 2024

Вступні випробування проводяться на основі екзаменаційних питань навчальних програм дисциплін циклу професійної та практичної підготовки навчальних планів спеціальностей 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Фахове випробування – форма вступного випробування для вступу на основі здобутого (або такого, що здобувається) ступеня або освітньо-кваліфікаційного рівня вищої освіти, яка передбачає перевірку здатності до опанування освітньої програми певного рівня вищої освіти на основі здобутих раніше компетенцій.

Спеціальність магістр (на основі Бакалавра).

Галузь: 10 Природничі науки.

Спеціальності: 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Факультет: фізичний.

Освітні програми: Теоретична фізика та астрофізика, Експериментальна фізика, Квантові комп'ютери та квантове програмування, Прикладна фізика та наноматеріали.

Тип пропозиції: Фіксована.

Зарахування на 1 курс.

Підстави зарахування: наявність вищої освіти першого (бакалаврського) рівня.

Згідно з пунктом 8.4, Розділу VII «Порядку прийому на навчання для здобуття вищої освіти

в

для конкурсного відбору на навчання для здобуття ступеня магістра на основі НРК6 та НРК7:

р Конкурсний бал (КБ) = $0,2 \times П1 + 0,2 \times П2 + 0,6 \times П3$,

о де:

ц П1 – оцінка тесту загальної навчальної компетентності ЄВІ;

і П2 – оцінка тесту з іноземної мови ЄВІ;

» П3 – оцінка ЄФВВ (ЄДКІ) або оцінка фахового іспиту в передбачених цим Порядком випадках.

(Оцінка вступного іспиту для іноземців є єдиною складовою конкурсного балу для цієї категорії вступників».

о

с Вступні випробування проводяться на основі екзаменаційних питань із нормативних навчальних дисциплін циклу загальної підготовки та циклу професійної та практичної підготовки спеціальностей 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали. Базу тестів фахового вступного випробування спеціальностей 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали на освітній рівень «Магістр» складають 3000 тестів з дисциплін: Механіка; Молекулярна фізика; Електрика та магнетизм; Оптика; Атомна фізика; Ядерна фізика; Теоретична механіка і основи механіки суцільних середовищ; електродинаміка; Квантова механіка; Термодинаміка і статистична фізика; Методи математичної фізики.

з Працівники Приймальної комісії Університету формують індивідуальні набори тестів за кількістю вступників у день фахових випробувань. Тести мають форму бланкового опитування та складаються з 25 тестових питань. Абітурієнт має визначити правильну відповідь серед наведених варіантів відповідей.

о Оцінка за фахове вступне випробування оцінюється шкалою 100-200 балів. Кожна правильна відповідь оцінюється чотирма балами.

л Академічна добросовісність під час складання іспиту. Очікується, що вступники під час фахового іспиту спиратися виключно на власні знання. Списування, втручання у роботу інших вступників, отримання додаткової інформації за допомогою різноманітних приладів та носіїв інформації тощо становлять (але не обмежують) приклади можливої академічної недобросовісності. Виявлення ознак академічної недобросовісності під час складання фахового іспиту є підставою для незарахування результатів приймальною комісією, незалежно від масштабів списування чи обману в будь-якій формі.

м

ПЕРЕЛІК РОЗДІЛІВ ТА ТЕМ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ФАХОВОГО ВСТУПНОГО ВИПРОБУВАННЯ

I. МЕХАНІКА

Системи відліку. Кінематичний опис руху матеріальної точки. Тангенціальне і нормальне прискорення. Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту. Розмірності механічних величин і одиниці вимірювання.

Сили в механіці. Закони Ньютона. Визначення кількості збережуваних величин (фазовий простір). Закон збереження енергії. Рух тіла змінної маси. Ракети.

Умови виникнення коливань. Гармонічний осцилятор. Загасаючі коливання осцилятора. Вимушені коливання осцилятора. Математичний маятник. Суперпозиція одновимірних коливань одного напрямку.

Обертання матеріальної точки навколо осі. Момент сили та момент імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу. Два еквівалентні способи опису обертового руху матеріальної точки.

Принцип відносності Галілея. Неінерційні системи відліку. Обертові системи відліку у циліндричних координатах. Земля як неінерційна система відліку. Маятник Фуко.

Прискорення вільного падіння. Передумови виникнення спеціальної теорії відносності. Постулати спеціальної теорії відносності. Перетворення Лоренца. Перетворення швидкостей і прискорень. Простір Мінковського. Центр мас. Система центра мас. Рух двох гравітуючих мас.

Обертання твердого тіла навколо нерухомої осі. Моменти інерції твердих тіл простої форми. Теорема Гюйгенса-Штейнера. Фізичний маятник. Гіроскопи.

Деформації твердого тіла. Стани речовини. Рівняння переносу. Дифузія, теплопровідність та в'язкість.

Рівняння неперервності. Рівняння Бернуллі і його застосування. Рівняння збереження імпульсу для неперервного середовища. Рівняння збереження енергії для неперервного середовища.

Рівняння Нав'є-Стокса.

II. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА ТА ТЕРМОДИНАМІКА

Вступ. Предмет молекулярної фізики. Модель матеріального тіла. Маса атомів і молекул. Кількість речовини. Модель ідеального газу. Динамічний, статистичний і термодинамічний методи опису речовини. Тиск і температура. Основне рівняння кінетичної теорії газів. Вимірювання температури. Емпіричні шкали температур. Абсолютна термодинамічна шкала температур. Середня кінетична енергія та температура.

Задачі термодинаміки. 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. Другий закон термодинаміки. Коефіцієнти корисної дії теплової і холодильної машини. Циклічні процеси. Коефіцієнт корисної дії. Цикл Карно. Теореми Карно. Нерівність Клаузіуса. Визначення ентропії ідеального газу. Фізичний зміст ентропії. Ентропія і термодинамічна імовірність. Третій закон термодинаміки. Теплова теорема Нернста. Постулат Планка. Формулювання третього закону термодинаміки. Властивості речовин при температурі 0 К.

Розподіл Максвелла молекул за швидкостями. Експериментальна перевірка розподілу Максвелла. Частота ударів молекул об стінку. Розподіл молекул за кінетичною енергією. Середнє число частинок в об'ємі. Флуктуації. Розподіл Больцмана. Барометрична формула. Розподіл Максвелла-Больцмана. Броунівський рух. Розрахунок руху броунівської частинки. Обертовий броунівський рух. Експериментальне визначення сталої Больцмана. Досліди Перрена.

Кінематичні характеристики молекулярного руху. Середня довжина вільного пробігу. Вакуум. Методи отримання та вимірювання вакууму. Процеси переносу в газах. Дифузія, теплопровідність, в'язкість газів. Зв'язок між коефіцієнтами процесів переносу в газах.

Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Ізотерми реального газу. Критичний стан речовини. Внутрішня енергія реального газу. Рівняння політропи реального газу. Явище Джоуля-Томсона. Зрідження газів. Методи охолодження газів.

Рідини. Молекулярно-кінетична характеристика рідкого стану. В'язкість та дифузія в рідині.

Поверхневий натяг рідин. Вільна поверхнева енергія. Змочування і незмочування. Формула Лапласа. Капілярні явища. Випаровування та кипіння рідин.

Рідкі розчини. Їх кількісні характеристики. Ідеальні розчини. Закон Рауля. Закон Генрі. Осмотичний тиск. Закон Вант-Гоффа.

Тверді тіла. Класифікація твердих тіл. Симетрія кристалів. Кристалічна гратка. Реальні кристали. Механічні властивості твердих тіл. Пружня деформація. Закон Гука.

Фазові переходи. Фазові переходи I і II роду. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса. Поліморфні перетворення. Фазові діаграми.

III. ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ

1. Вступ до електрики і магнетизму.

Предмет та методи електрики і магнетизму. Електромагнітна взаємодія та її місце в природі серед інших взаємодій. Короткий історичний огляд вчення про електрику і магнетизм. Значення електрики сьогодні. Електричний заряд. Два види заряду. Інваріантність і закон збереження заряду. Експериментальне визначення заряду електрона. Найпростіші заряджені тіла. Точковий і неперервний розподіли заряду.

2. Електростатика

Взаємодія точкових заряджених тіл. Закон Кулона. Електричне поле. Вектор напруженості електричного поля. Принцип суперпозиції електричних полів. Лінії напруженості. Потік вектору напруженості електричного поля. Теорема Гаусса, її подання в диференціальній формі.

Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електростатичного поля. Циркуляція вектору напруженості. Потенціал та різниця потенціалів. Зв'язок потенціалу з вектором напруженості поля. Еквіпотенціальні поверхні. Електричний диполь. Поле диполя. Потенціал і напруженість поля диполя.

3. Провідники в електричному полі

Напруженість поля біля поверхні та всередині провідника. Електростатична індукція. Розподіл заряду на поверхні провідника. Властивість замкнутого провідника. Електростатичний захист. Рівняння Пуассона і Лапласа.

Зв'язок між зарядом і потенціалом провідника. Електроємність. Конденсатори. Ємність плоского, сферичного і циліндричного конденсаторів.

4. Діелектрики в електричному полі

Діелектрики. Полярні та неполярні молекули. Вільні та зв'язані заряди. Вектор поляризації.

Діелектрична сприйнятливості середовища. Поняття про тензор діелектричної сприйнятливості.

Теорема Остроградського-Гаусса для поля в діелектрику. Вектор електричної індукції. Діелектрична проникливість.

Граничні умови для векторів поляризації, напруженості та індукції електричного поля.

Заломлення ліній, напруженості та індукції на межі двох діелектриків.

Поле в однорідному діелектрику. Потенціальна енергія системи електричних зарядів. Енергія зарядженого провідника. Енергія зарядженого конденсатора. Енергія електростатичного поля та її об'ємна густина. Сили, які діють на заряд в діелектрику. Неполярні діелектрики. Формула Клаузіуса-Мосотті.

Електричні властивості кристалів. Анізотропія діелектричної проникливості. П'єзоелектрики. Прямий та обернений п'єзоэффект і його застосування. Полярні діелектрики. Піроелектрики. Сегнетоелектрики. Доменна структура сегнетоелектриків. Гістерезис. Точка Кюрі сегнетоелектриків. Використання сегнетоелектриків.

5. Постійний електричний струм

Сила і густина струму. Рівняння неперервності, його диференціальна форма. Джерела струму. Електрорушійна сила. Електрична напруга. Закон Ома для однорідного провідника. Опір провідників. Закон Ома в диференціальній та інтегральній формах. Неоднорідне електричне коло.

Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца та його диференціальна форма. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа та їхнє застосування. К.к.д. джерела струму.

6. Електричний струм у вакуумі, рідинах та газах

Термоелектронна емісія. Робота виходу. Залежність струму насичення від температури. Формула Річардсона.

Струм в електролітах. Дисоціація. Закон Оствальда. Провідність електролітів. Електродний потенціал. Електроліз. Закони Фарадея. Застосування електролізу. Хімічні джерела струму. Вольтів стовп. Акумулятори.

Струм у газі. Несамостійний і самостійний розряд. Процеси іонізації та рекомбінації. Рівноважна концентрація іонів. Ударна іонізація. Виникнення самостійних розрядів. Лавинний ефект. Воль-амперна характеристика газового розряду. Види газового розряду (гліючий, дуговий, іскровий, коронний, плазма). Використання газових розрядів.

7. Механізми електропровідності

Провідники. Досліди Рікке, Толмена і Стюарта. Основні положення класичної електронної теорії провідності металів. Закони Ома та Джоуля-Ленца в класичній теорії. Закон Відемана-Франца. Труднощі класичної теорії провідності.

Поняття про квантову теорію провідності твердих тіл. Принцип Паулі. Статистика Фермі-Дірака. Залежність опору металів від температури. Надпровідність. Критичне магнітне поле. Застосування надпровідників.

Особливості зонної структури діелектриків, напівпровідників і металів. Енергетичні рівні та зони. Валентна зона. Зона провідності. Власна провідність напівпровідників. Електрони і дірки. Донорні та акцепторні домішки. Домішкова провідність. Залежність опору напівпровідників від температури. Провідність р- та n- типів. р-n-перехід. Застосування напівпровідників: діоди, транзистори. Вольт-амперна характеристика р-n-переходу. Рівняння Шоклі. Зворотній струм. Бар'єрна ємність.

Контактні явища. Робота виходу. Хімічний потенціал. Зовнішня та внутрішня контактна різниця потенціалів. Закони Вольти. Явища Зеебека, Пельтье і Томсона. Термо-е.р.с. Термопари. Термоелектричні пристрої.

8. Постійне магнітне поле у вакуумі

Магнетизм. Дія магнітного поля на струм. Елемент струму. Вектор індукції магнітного поля. Закон Біо-Савара-Лапласа. Магнітне поле рухомого заряду. Магнітне поле прямого та колового струмів. Магнітна взаємодія паралельних струмів.

Напруженість магнітного поля. Силкові лінії магнітного поля. Вихровий характер магнітного поля. Відсутність магнітних зарядів. Потік вектора магнітної індукції (магнітний потік). Теорема про циркуляцію вектора індукції магнітного поля. Закон повного струму. Тороїдальна котушка. Соленоїд.

Закон Ампера. Механічна робота в магнітному полі. Сила Лорентца. Ефект Холла. Сенсори Холла.

9. Магнетика

Магнітне поле в речовині. Магнітний момент струму. Вектор намагнічення. Теорема про циркуляцію магнітного поля в середовищі. Магнітна сприйнятливість і магнітна проникливість. Зв'язок індукції та напруженості магнітного поля в магнетиках. Граничні умови для векторів напруженості та індукції магнітного поля.

Класифікація магнетиків: діамагнетиками і парамагнетиками. Гіромагнітне відношення. Ларморова частота. Магнітомеханічні явища.

Феромагнетиками. Магнітний гістерезис. Домени. Коерцитивна сила. Робота під час намагнічування.

Точка Кюрі. Магнітне поле Землі. Магнітні матеріали. Ферити. Магнітний запис інформації.

10. Електромагнітна індукція

Досліди Фарадея. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца. Вихрові струми. Скін-ефект. Явище самоіндукції, індуктивність. Взаємна індукція. Коефіцієнт взаємної індукції. Енергія і густина енергії магнітного поля.

11. Змінний квазістаціонарний струм

Квазістаціонарні струми. Активний, індуктивний та ємнісний опір. Метод векторних діаграм. Закон Ома для кіл змінного струму. Резонанс напруг. Резонанс струмів.

Робота і потужність змінного струму. Ефективні значення струму та напруги. Трансформатор. Принцип дії, будова, застосування. Коефіцієнт трансформації. Технічне використання змінних

струмів. Двофазний струм. Трифазний струм. З'єднання обмоток генератора „зіркою” і „трикутником”. Генератори і електродвигуни змінного струму.

12. Електромагнітні коливання

Перехідні процеси в RL, RC та LC колах. Коливальний контур. Власні коливання в контурі. Рівняння гармонічних коливань. Загасаючі коливання. Логарифмічний декремент загасання. Добротність контуру. Вимушені електромагнітні коливання. Добротність і смуга пропускання контуру.

13. Рівняння Максвелла

Електромагнітне поле. Рівняння Максвелла, як узагальнення експериментальних даних. Струм зміщення. Вихрове електричне поле. Взаємні перетворення електричного та магнітного полів. Рівняння Максвелла в інтегральній і диференціальній формі.

Хвильове рівняння. Електромагнітні хвилі. Фазова швидкість. Поперечність електромагнітних хвиль. Монохроматичні хвилі. Хвильове число. Вектор Умова-Пойнтінга. Закон збереження енергії електромагнітного поля. Випромінювання електромагнітних хвиль. Вібратор Герца. Радіозв'язок.

14. Основи радіоелектроніки

Радіоелектроніка та її складові частини: радіотехніка, радіофізика, вакуумна, напівпровідникова, мікро-, нано-, оптоелектроніка. Радіохвилі та їхнє генерування, діапазони радіохвиль. Швидкість передачі інформації. Формула Шеннона. Закон Мура.

Сигнали в електроніці. Класифікація сигналів. Детерміновані та випадкові сигнали. Ряди Фур'є. Спектри періодичних сигналів. Приклади найпростіших спектрів. Неперіодичні сигнали. Пряме і обернене перетворення Фур'є. Імпульсна характеристика та перехідна характеристика. Інтеграл суперпозиції (згортка). Частотна характеристика.

Метод комплексних амплітуд. Комплексні амплітуди струмів та напруг. Фазор. Імпеданс. Закон Ома і правила Кірхгофа в комплексній формі. Комплексна потужність. Децибелі в електроніці. Переваги і недоліки відносних одиниць дБ. Відносна одиниця непер.

Цифрова обробка сигналів. Дискретизація та квантування аналогових сигналів. Теорема Котельникова. Частота Найквіста. Ряд Котельникова. Дискретне перетворення Фур'є. Швидке перетворення Фур'є. Цифрові фільтри.

IV. ОПТИКА

Етапи розвитку оптики, їх значення для формування сучасного наукового світогляду та для практики. Головні здобутки цього напрямку фізики в останні десятиліття.

1. Класичні закони оптики.

Незалежність світлових пучків, швидкість світла, спроби її пояснення на базі світлового ефіру, хвилі і частинки. Пояснення заломлення світла за Ньютоном та Гюйгенсом. Принцип Ферма. Принцип Гюйгенса.

Електромагнітна теорія світла. Рівняння Максвелла і висновки з них. Система векторів електромагнітної хвилі. Енергетичне співвідношення векторів електричного і магнітного поля світлової хвилі. Оптичний вектор. Опис коливань та хвиль. Розклад Фур'є. Спектр. Класифікація хвиль – плоскі, сферичні, монохроматичні.

Основні фотометричні поняття та величини. Співвідношення між енергетичними та світловими характеристиками випромінювання. Методи порівняння світлових пучків та можливості абсолютних вимірювань їх енергій. Неселективні приймачі світла.

2. Інтерференція світла.

Двопроменева інтерференція світла. Когерентність та її реалізація в оптиці. Інтерференція хвиль. Схема Юнга. Умови екстремумів, розподіл інтенсивності при двопроменевій інтерференції. Часова і просторова когерентність. Оптична довжина шляху. Таутохронізм. Розміри джерела та апертура інтерференції.

Кольори тонких плівок, допустима товщина плівок. Вираз для різниці фаз. Кільця Ньютона. Стоячі хвилі. Дослід Вінера.

Багатопроменева інтерференція: способи реалізації, умови екстремумів, характер спектру. Формули Ейрі.

Застосування інтерференції. Інтерферометри. Просвітлена оптика, інтерференційні фільтри

та дзеркала. Порівняння довжини хвилі з кінцевою мірою.

3. Дифракція світла.

Означення дифракції. Принцип Гюйгенса – Френеля. Зони Френеля, зональна пластинка – амплітудна і фазова. Графічне складання амплітуд. Спіраль Корню. Дифракція на різних перепонах: півплощина, щілина, прямокутний та круглий отвори.

Дифракція на двох щілинах, дифракційна решітка – амплітудна і фазова. Умови екстремумів, розподіл інтенсивності. Похиле падіння світла на решітку. Спектральні характеристики решіток.

Дифракція на багатомірних структурах. Структурний аналіз. Дифракція рентгенівських променів, електронів та нейтронів. Хвилі де Бройля. Застосування дифракції. Зоряний інтерферометр Майкельсона.

4. Оптична голографія.

Основні поняття, схеми отримання голограм та відтворення зображень предмета. Порівняння фотографічних та голографічних зображень предмета.

Голограма точки. Об'ємна голографія Денисюка, кольорова голограма. Застосування голографії.

5. Геометрична оптика.

Основні поняття та умови застосування геометричної оптики. Принцип Ферма і висновки з нього. Прямолінійність поширення та відбивання світла в однорідному середовищі. Заломлення світла на плоскій та сферичній поверхнях. Нуль – інваріант Аббе, інваріант Лагранжа – Гельмгольца, збільшення сферичної поверхні. Тонка і товста лінзи, характерні елементи ідеальної оптичної системи. Відповідні робочі формули. Роздільна здатність об'єктива, дифракційна теорія зображення Аббе, метод фазового контрасту. Оптичні прилади – лупа, мікроскоп, телескоп, будова і хід променів.

Діафрагми оптичних систем, їх положення і роль в утворенні зображень. Аберации оптичних систем, їх походження і методи зменшення. Оптика зору. Будова і загальна характеристика ока. Основні недоліки зору.

6. Оптика рухомих середовищ.

Методи вимірювання швидкості світла – астрономічні та лабораторні експериментальні основи оптики рухомих середовищ: ефект Доплера, дослід Фізо, дослід Майкельсона.

Елементи спеціальної теорії відносності. Перетворення Лорентца-Айнштейна і висновки з них: одночасність подій, порівняння довжин відрізків та тривалості подій у рухомих системах координат. Додавання швидкостей. Коефіцієнт захоплення ефіру рухомими тілами. Поперечний і поздовжній ефект Доплера. Червоне зміщення. Дослід Айвса. Ефект Саньяка. Оптичний гіроскоп. Ефект Черенкова-Вавілова. Залежність маси тіла від швидкості його руху. Розпад мезонів.

7. Поляризація світла.

Визначення і види поляризації світла, її пояснення на базі хвильової і квантової теорії світла.

Зміни характеристик світлового пучка на межі двох середовищ. Формули Френеля і висновки з них. Кутові залежності інтенсивності, фази та стану поляризації заломленого і відбитого пучків світла. Закон Брюстера, його фізичний зміст. Повне внутрішнє відбивання світла.

Відбивання світла від металів. Комплексний показник заломлення. Застосування відбитого світла у техніці (поляризатори, фазові пристрої, світловоди, фокони) та у фізичному експерименті (дослідження оптичних характеристик в області сильного поглинання, вимірювання показників заломлення).

8. Дисперсія світла.

Методи вимірювання показників заломлення: метод мінімального відхилення, метод повного внутрішнього відбивання, інтерференційні методи. Величини і спектральні залежності показників заломлення прозорих матеріалів. Нормальна, аномальна та від'ємна дисперсії.

Електронна теорія дисперсії світла. Дисперсійна формула. Сила осцилятора. Уявлення про квантову теорію дисперсії показника заломлення. Показники заломлення речовин в особливих ділянках спектра – рентгенівська область, область γ -променів, плазма.

Вплив взаємодії частинок речовини на дисперсію світла. Формула Лорентц-Лоренца. Рефракція, її застосування у хімії.

Дисперсія показника заломлення твердих тіл, вплив коливань решітки. Формула Зельмейєра.

Спектри поглинання. Спектральний аналіз. Метод Крамерса-Кроніга для визначення оптичних характеристик матеріалу в області сильного поглинання.

Оптика метаматеріалів.

9. Оптика анізотропних середовищ.

Оптична анізотропія та її опис на основі рівнянь Максвелла. Система векторів електромагнітної хвилі у кристалах. Симетрія кристала та тензор діелектричної сталої. Поляризація світла та лінійне двоприменезаломлення.

Оптична індикатриса. Правило індикатриса. Подвійні оптичні поверхні. Оптичні осі. Заломлення світла у кристалах. Побудова Гюйгенса.

Просторова дисперсія світла у кристалах. Циркулярне двоприменезаломлення. Повертання площини поляризації, його пояснення за Фарадеєм. Гіраційні поверхні. Симетрія та оптична активність. Оптичні властивості рідких кристалів.

Інтерференція поляризованих променів, схема експериментально її реалізації. Пропускання світла поляризаційно-оптичною системою. Отримання та аналіз поляризаційного світла. Поляризаційні пристрої на базі кристалів. Застосування поляризованого світла.

Коноскопічні дослідження кристалів.

10. Оптичні параметричні ефекти.

Визначення та феноменологічний опис параметричних ефектів – електрооптичний, п'єзооптичний, магнітооптичний, електрогірація, п'єзогірація, ефект Фарадея, невзаємне двоприменезаломлення, залежність показника заломлення від інтенсивності світла. Оптичні схеми для спостереження та застосування параметричних ефектів. Симетрія речовини і наявність ефекту.

Модельний опис параметричних ефектів.

Застосування параметричних ефектів у метрології. Часові вимірювання з використанням нелінійно-оптичних ефектів.

11. Теплове випромінювання світла.

Методи дослідження спектральної залежності випромінювання абсолютно чорного тіла, графічне представлення їх результатів. Закони теплового випромінювання. Закони Кірхгофа, Стефана-Больцмана, зміщення Віна.

Формула Релея-Джінса. Формула Планка та основні міркування при її виведенні, основні висновки з неї.

Оптична пірометрія, радіаційна, яскравісна та кольорова температура.

Використання формули Планка в спектральних оптичних вимірюваннях.

12. Квантові властивості світла.

Спонтанне та вимушене випромінювання, коефіцієнти Ейнштейна та формула Планка.

Зовнішній фотоэффект – опис явища, основні закони та рівняння Айнштейна для зовнішнього фотоэффекту, пояснення законів фотоэффекту на базі хвильових та корпускулярних уявлень про світло. Фотоприймачі. Фотоэффект у напівпровідниках та діелектриках.

Явище Комптона, імпульс фотона. Тиск світла, його пояснення на базі хвильових та корпускулярних уявлень.

Ефект Садовського, схема досліду Бета.

Квантові характеристики фотона.

13. Розсіювання світла.

Розсіювання світла в оптично неоднорідному середовищі. Молекулярне розсіювання. Формула Релея. Індикатриса розсіювання. Комбінаційне розсіювання світла – методика експерименту, властивості та застосування. Поляризація розсіяного світла. Розсіювання світла та атмосферні оптичні явища.

14. Люмінесценція.

Означення та класифікація люмінесценції за типом збудження свічення. Характеристики люмінесценції – спектральні залежності інтенсивності, часові зміни свічення, енергетичний та квантовий вихід свічення.

Природа центрів свічення – власне свічення, дискретні центри, рекомбінаційне свічення. Моделі центрів свічення – електричний диполь та ротатор, електричний квадруполь, магнітний диполь. Механізми свічення речовин у різних агрегатних станах. Люмінесценція кристалофосфорів. Основно-валентне свічення. Застосування люмінесценції.

15. Лазери.

Загальні відомості про будову лазера. Енергетична структура активного елемента лазера. Умови виникнення генерації. Властивості лазерного випромінювання. Основні типи лазерів та їх характеристики. Керування характеристиками лазерів – модуляція добротності, синхронізація мод.

Застосування лазерів.

16. Елементи нелінійної оптики.

Поняття про нелінійну оптику. Нелінійна поляризація і показники заломлення речовини. Когерентні та некогерентні нелінійно-оптичні ефекти. Багатофотонне поглинання, просвітлення зразка, самофокусування, самодифракція.

Відбивання світла у нелінійній оптиці. Прояви квадратичної нелінійності – генерація другої гармоніки, детектування поля світлової хвилі, підсилення світла. Параметричні генератори. Вимушене комбінаційне розсіювання світла та вимушене розсіяння Мандельштама-Бріллюена. Випрямлення фронту світлової хвилі.

АТОМНА ФІЗИКА

1. Предмет вивчення атомної фізики

Структурні рівні матерії, що досліджуються методами атомної та ядерної фізики. Особливості об'єктів мікросвіту (атомізм, дискретність, корпускулярно-хвильовий дуалізм).

Теплове випромінювання і становлення квантової механіки

Модель абсолютно чорного тіла. Середня густина випромінювання. Виведення формул Релея-Джінса та Віна для опису випромінювання абсолютно чорного тіла. Ультрафіолетова катастрофа.

Формула Планка для опису випромінювання абсолютно чорного тіла. Стала Планка.

3. Моделі атома

Модель атома Томсона (дискретність, частота випромінювання, розміри атома). Модель атома Резерфорда. Експериментальні результати по вивченню розсіювання α -частинок на атомах. Рівняння руху α -частинки в кулонівському полі атома. Кут розсіювання та прицільний параметр. Поперечний та диференціальний переріз розсіювання. Формула Резерфорда. Визначення заряду ядра та розмірів ядра на основі аналізу розсіювання α -частинок на атомах.

4. Борівська модель атома водню

Спектри випромінювання – як відображення дискретності енергетичних рівнів атома. Форма спектрів випромінювання твердих тіл, молекул, атомів. Закономірності в спектрах випромінювання атома водню. Спектральні серії Лаймана, Бальмера, Пашена... Узагальнена формула Бальмера. Енергетичні терми. Досліди Франка і Герца. Дискретність енергетичних рівнів атомів.

Постулати Бора (стаціонарні орбіти, енергія випромінювання, умова квантування орбіт). Атом водню в теорії Бора. Формули для визначення радіусів орбіт та енергій електронних станів атома водню. Формула для визначення енергії переходів в атомі водню (водневі серії). Стала Рідберга. Ізотопічний зсув в спектрах випромінювання атома водню.

Умови квантування електронних орбіт Бора-Зомерфельда

Узагальнюючі координати та імпульси. Умови квантування Зомерфельда для колових та еліптичних орбіт. Квантові числа – головне та азимутальне. Просторове квантування в моделі Бора-Зомерфельда. Магнітне квантове число. Магнітний та механічний моменти електрона, магнетон Бора.

Досліди Штерна-Герлаха. Атом в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Залежність розщеплення атомного пучка в неоднорідному магнітному полі від орбітального та спінового моменту електрона. Спін електрона. Магнітне спінове число.

6. Хвильова механіка (початки квантової механіки)

Гіпотеза де Бройля, рівняння де Бройля. Довжина хвилі де Бройля для електрона. Експериментальна перевірка гіпотези де Бройля. Дифракція електронів. Досліди Девісона і Джермера, Томсона та Тартаковського.

Представлення електрона в моделі пакету хвиль. Електрон та монохроматична хвиля. Фазова та групова швидкість групи хвиль. Ширина хвильового пакету. Виведення співвідношення невизначеності Гейзенберга.

Хвильова функція електрона. Статистична інтерпретація хвильової функції.

7. Рівняння Шредінгера – основне рівняння квантової механіки

Хвильове рівняння. Стаціонарне рівняння Шредінгера. Рівняння Шредінгера залежне від часу. Енергетичні рівні та хвильові функції електрона в безмежній потенціальній ямі. Ефект тунелювання. Енергетичні рівні та характер хвильових функцій квантового осцилятора.

8. Атом водню в квантовій механіці

Рівняння Шредінгера для атома водню в сферичній системі координат. Схема розв'язування. Рівняння Шредінгера для хвильових функцій $R(r)$, $\Theta(\theta)$ і $\Phi(\phi)$ та аналіз їх розв'язків. Магнітне, орбітальне та головне квантові числа.

Електронні орбіталі. Радіальна функція та розміри електронних орбіталей. Форма радіальних функцій для 1s- та 2s- електронних орбіталей. Залежність форми та просторової орієнтації електронних орбіталей від орбітального та магнітного квантових чисел. Форма s-, p- та d- електронних орбіталей.

9. Забудова електронних шарів та оболонок атомів

Поняття електронного шару та оболонки. Принципи забудови електронних шарів. Принцип мінімуму енергії та принцип Паулі. Кількість електронів в шарах та оболонках.

Періодична система хімічних елементів як відображення правил заповнення електронних шарів та оболонок. Залежність енергії електронів від основного та орбітального квантових чисел. Забудова електронних шарів першої, другої та третьої груп періодичної системи елементів. Особливості забудови електронних шарів хімічних елементів за участю d- електронів. Розташування в періодичній системі елементів з 4f- та 5f-електронами.

10. Спін орбітальна взаємодія

Природа спін-орбітальної взаємодії. Повний момент електрона. Квантове число $-j$. Вираз для обчислення спін-орбітальної взаємодії.

Позначення енергетичних термів одноелектронних атомів. Енергетичні рівні атома натрію.

Енергетичні рівні атома водню з врахуванням спін-орбітальної взаємодії. Зсув Лемба. Поняття електромагнітного вакууму.

11. Енергетична структура та спектри багатоелектронних атомів

Додавання моментів у випадку багатоелектронних атомів. Зв'язок Рассел-Саундерса та $j-j$ зв'язок. Визначення моментів для нормального зв'язку.

Правила Гунда для визначення електронного терму основного стану. Терми p^2 – конфігурації в основному та збудженому станах. Енергетичні рівні та переходи в атомі ртуті. Енергетичні рівні та спектри атома гелію (ортогелій та парагелій).

12. Атом в магнітному полі

Зв'язок між магнітним та механічним моментами електрона у випадку врахування спіну електрона. Множник Ланде.

Розщеплення енергетичних рівнів атомів у магнітному полі. Взаємодія між магнітним моментом електрона та зовнішнім магнітним полем. Поперечний та повздовжній ефект Зеемана. Пояснення ефекту Зеемана в моделі осциляторів. Нормальний ефект Зеемана. Аномальний ефект Зеемана. Ефект Пашена-Бека.

13. Рентгенівське випромінювання

Природа та типи рентгенівського випромінювання. Рентгенівські спектри. Закон Мозлі. Тонка структура спектрів рентгенівського випромінювання. Властивості рентгенівських променів. Ефект Комптона.

14. Спектри молекул

Характер взаємодії між атомами, типи зв'язку. Електронна, коливна та обертова енергія молекул. Енергетичні рівні молекул.

Комбінаційне розсіювання світла.

15. Оптичні квантові генератори

Класифікація лазерів за режимом роботи, активним елементом, способом збудження. Принцип дії лазера. Інверсна заселеність. Трирівнева, чотирирівнева енергетичні схеми лазера. Твердотільні лазери. Лазер на рубіні. Різновидності газових лазерів. Гелій-неоновий лазер. Основні характеристики лазерного випромінювання (когерентність, монохроматичність, поляризація, висока інтенсивність, прямолінійність поширення).

. Рух електрона в магнітному та електричному полях

Методи визначення питомого заряду електрона (метод Томсона, метод Кірхнера, метод магнетрона). Елементи електронної оптики. Електронний мікроскоп. Мас-спектроскопія. Будова і характеристики мас-спектральних приладів.

ЯДЕРНА ФІЗИКА

Ядерна модель атома. Визначення розміру та заряду ядра. Протонно-нейтронний склад ядра. Енергія зв'язку ядер, ядерні сили. Формула Вайцзеккера.

Проходження електронів через поглинаючі середовища. Пружне розсіювання електронів ядрами. Іонізаційні втрати для швидких електронів. Втрати на випромінювання. Ефект Черенкова. Джерела нуклонів. Взаємодія нуклонів з речовиною. Спіни і магнітні моменти нуклонів. Структура нуклонів, досліди Хофштадтера.

Ядерні сили. Дейтрон, потенціали взаємодії. Обмінні сили. Мезонна теорія ядерних сил. Потенціал Юкава.

Гамма-випромінювання ядер. Внутрішня конверсія електронів. Ефект Месбауера. Магнітний момент ядра, метод Рабі. Спін і магнітний момент ядра. Ядерна ізомерія.

Ядерні моделі. Модель рідкої краплі. Альфа-частинкова модель. Модель Фермі-газу. Модель ядерних оболонок. Узагальнена модель ядра. Оптична модель ядра.

Прискорювачі частинок. Електростатичний прискорювач. Циклотрон, бетатрон. Фазотрон, синхротрон. Синхрофазотрон.

Взаємодія гамма- та ікс-променів з речовиною. Фотоефект. Ефект Комптона. Утворення електрон-позитронних пар. Фотонно-електронні зливи. Повний коефіцієнт послаблення.

Основні види і особливості радіоактивного розпаду Закон радіоактивного розпаду. Вікова радіоактивна рівновага. Природні радіоактивні ядра. Радіоактивні ряди. Альфа-розпад. Тонка структура альфа-спектру. Теорія альфа-розпаду. Бета-перетворення. Досліди з виявлення нейтрино. Втрата парності при бета-розпаді. Досліди Ву. Методи реєстрації заряджених частинок і гамма-квантів.

Ендотермічні та екзотермічні ядерні реакції. Переріз ядерної реакції. Ядерні реакції під дією нейтронів. Поділ важких ядер. Ланцюгові ядерні реакції. Використання енергії поділу. Практичне здійснення ланцюгового ядерного процесу. Ядерні реактори. Надважкі ядра. Фотоядерні реакції. Реакції термоядерного синтезу. Проблема керованої термоядерної реакції. Магнітна ізоляція плазми. Термоядерні реакції у Всесвіті. Протонно-протонний і вуглецево-азотний цикл.

Фізика високих енергій. Критерій елементарності. Основні характеристики елементарних частинок. Закони збереження. Лептони, закон збереження лептонного заряду. Баріони, закон збереження баріонного заряду. Ізотопічний спін. Ізотопічна інваріантність. Дивні частинки. Взаємодія елементарних частинок. Види взаємодії. Модель кварків.

Дозиметричні одиниці. Дозиметрія і захист від випромінювання.

ТЕОРЕТИЧНА МЕХАНІКА

Вступ до теоретичної механіки

Основні поняття кінематики матеріальної точки. Системи відліку у механіці. Швидкість і прискорення у криволінійних координатах. Тангенціальне і нормальне прискорення.

Поняття про силу і масу, принцип суперпозиції сил. Інерційні системи відліку. Закони Ньютона. Інтегрування рівнянь Ньютона. Імпульс сили та імпульс тіла. Момент імпульсу матеріальної точки та момент сил. Енергія матеріальної точки. Закони зміни та збереження імпульсу, моменту імпульсу та енергії матеріальної точки. Класифікація сил у механіці. Робота сил.

Системи матеріальних точок, центр мас. Імпульс, момент імпульсу системи матеріальних точок. Закони зміни та збереження імпульсу та моменту імпульсу для системи матеріальних точок. Енергія системи матеріальних точок. Закон зміни та збереження енергії системи матеріальних точок. Поняття про інтеграли руху. Адитивні інтеграли руху.

Задача двох тіл. Інтегрالی руху для задачі двох тіл. Рух у полі центальної сили. Задача Кеплера, закони Кеплера.

Принцип Даламбера. Рівняння Лагранжа. Принцип найменшої дії

Основна задача динаміки невідільної точки. В'язі та їх класифікація, голономні та неголономні в'язі. Безмежно малі переміщення. Ідеальні в'язі. Рівняння Лагранжа I-го роду. Принцип д'Аламбера.

Ступені вільності механічної системи. Узагальнені координати. Рівняння Лагранжа II-го роду.

Рівняння Лагранжа при наявності дисипативних сил, дисипативна функція Релея. Узагальнені потенціальні сили. Узагальнена енергія, закон збереження узагальненої енергії. Коваріантність рівнянь Лагранжа.

Основні поняття варіаційного числення, варіація функції та варіація функціоналу. Функціонал дії. Принцип найменшої дії. Рівняння Лагранжа-Ейлера.

Основні поняття варіаційного числення, варіація функції та варіація функціоналу. Функціонал дії. Принцип найменшої дії. Рівняння Лагранжа-Ейлера.

Гамільтоновий формалізм. Рівняння Гамільтона-Якобі

Теорема Ліувілля, рівняння Ліувілля. Дія, як функція від координат і часу. Рівняння Гамільтона-Якобі. Теорема Якобі. Метод розділення змінних для рівняння Гамільтона-Якобі.

Застосування методів теоретичної механіки до конкретних систем.

Малі одновимірні коливання. Вимушені коливання, явище резонансу. Загасаючі коливання, декремент загасання. Вимушені коливання за наявності сили тертя.

Коливання систем з багатьма ступенями вільності. Динамічна матриця і власні частоти. Коливання молекул. Коливання одновимірного ланцюжка атомів, закон дисперсії коливань.

Нелінійні коливання, метод Боголюбова Крилова. Параметричний резонанс.

Рух твердого тіла. Ступені вільності твердого тіла. Кутова швидкість. Кінетична енергія твердого тіла. Тензор інерції, осі інерції, головні моменти інерції.

Момент імпульсу твердого тіла. Кути Ейлера. Обертання симетричної дзиги з однією закріпленою точкою. Неінерційні системи відліку. Рух у неінерційних системах відліку, сили інерції, сила Коріоліса.

Основні поняття механіки суцільних середовищ. Фізично безмежно мала частинка. Закон збереження маси і рівняння неперервності. Ідеальна рідина. Рівняння Ейлера для ідеальної рідини. Потенціальний рух ідеальної рідини.

Тензор енергії-імпульсу ідеальної рідини. Течія в'язкої рідини. Рівняння Нав'є-Стокса. Протікання в'язкої рідини через трубу круглого перетину, формула Пуазейля.

VIII. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

1. Рівняння електродинаміки для зарядів і струмів у вакуумі

Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки.

Математичний апарат електродинаміки: елементи векторного числення. δ -функція Дірака; густина точкового заряду.

Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів.

Закон Кулона; вихровий характер магнітного поля; закон Фарадея; джерела магнітного поля; закон Ерстеда; закон Ампера.

Потенціали електромагнітного поля.

Означення потенціалів, рівняння для потенціалів, градієнтна інваріантність електромагнітного поля, калібрування Кулона і Лоренца. Рівняння д'Аламбера. Поперечний струм.

Закони збереження.

Рівняння неперервності як форма запису закону збереження. Закон збереження заряду. Закон збереження енергії. Умови випромінювання. Закон збереження імпульсу. Тензор напружень.

Статичні поля у вакуумі.

Рівняння для статичних полів. Безпосереднє розв'язування рівнянь для потенціалів.

Мультипольні розвинення.

Потенціали і поля електричного та магнітного диполів. Електричний квадрупольний момент. Вищі мультипольні моменти.

. Теорія випромінювання

Вільне електромагнітне поле.

Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі. Фазова та групова швидкості. Поляризація електромагнітних хвиль. Закони збереження для вільного поля, енергія та

імпульс поля.

Потенціали Лієнара–Віхерта.

Поле рухомого точкового заряду: особливості диференціювання потенціалів Лієнара–Віхерта, обчислення полів.

Поля і потенціали заряду, який рухається.

Випромінювання точкового заряду. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя.

Поле системи зарядів на великих віддалях від джерела.

Близька і хвильова зони. Дипольне і квадрупольне випромінювання.

. Теорія відносності. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки

Принципи відносності. Інтервал між подіями. Чотиривимірні простори Мінковського.

Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.

Релятивістська механіка вільної частинки.

Інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, енергія й імпульс; 4-вектор енергії-імпульсу. Рівняння руху вільної частинки у формі Лагранжа–Ейлера, Гамільтона та Гамільтона–Якобі.

Заряджена частинка в електромагнітному полі.

Функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху. 4-потенціали поля і закони їх перетворення.

Тензор електромагнітного поля.

Варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського; тензор поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.

Основні співвідношення електродинаміки у просторі Мінковського.

4-форма рівнянь електродинаміки; варіаційний принцип в теорії поля; інтеграл дії для зарядів і поля; знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу. 4-форма законів збереження. Тензор енергії-імпульсу.

. Рівняння макроскопічної електродинаміки

Мікро- та макрополя, мікроскопічні рівняння Максвелла–Лоренца.

Усереднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів. Вектори поляризації та намагніченості. Умови на межі двох середовищ.

Поляризація і намагніченість середовища в постійних полях.

Неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі; діа- та парамагнетизм. Загальна характеристика матеріальних рівнянь.

Статичні поля в середовищі.

Енергія поля в середовищі, індуковані заряди і струми, індуктивності. Сили в статичних полях.

Поляризація середовища в змінному полі.

Комплексна діелектрична проникність, дисперсійні співвідношення. Дисперсні і прозорі середовища.

Умови квазістатичності та рівняння квазістатичних явищ.

Нормальний та аномальний скін-ефекти.

ІХ. КВАНТОВА МЕХАНІКА

1. Основні принципи квантової механіки

Опис стану в квантовій механіці. Хвильова функція. Принцип суперпозиції (приклад з теорії ядерних сил, квантової хімії, фізики твердого тіла, Кіт Шредінгера). Хвильовий пакет.

Хвильова функція вільної частинки. Властивості плоских хвиль. Середні значення координати та імпульсу. Оператор імпульсу. Співвідношення невизначеностей Гайзенберга. Мінімізуючий хвильовий пакет. (Приклади: розміри атомного ядра, рідкий гелій, енергія основного стану атома).

2. Математичний апарат квантової механіки

Оператори фізичних величин. Дії над операторами. Приклади операторів фізичних величин. Власні функції і власні значення операторів. Властивості власних значень і власних функцій

ермітових операторів.

Співвідношення невизначеностей для фізичних величин, що представляються некомутуючими операторами. Когерентні стани. Принцип доповнювальності Бора.

Різні представлення хвильових функцій. Бра- і Кет- вектори. Різні представлення операторів. Матриці операторів. Квантова механіка – теорія лінійних операторів в гільбертовому просторі.

3. Рівняння Шредінгера

Хвильове рівняння Шредінгера. Рівняння неперервності. Закон збереження густини ймовірності. Зміна середніх значень фізичних величин з часом.

Квантові дужки Пуасона. Стаціонарні стани. Представлення Шредінгера і представлення Гайзенберга. Представлення взаємодії.

Найпростіші задачі квантової механіки та момент кількості руху

4. Найпростіші задачі квантової механіки

Частинка в потенціальній ямі з безмежно високими стінками.

Гармонічний осцилятор. Хвильовий та матричний підходи. Оператори народження і знищення. Когерентні стани. Проходження частинки через потенціальний бар'єр.

5. Зв'язок квантової механіки з класичною

Перехід від квантових рівнянь руху до класичних. Розпливання хвильових пакетів з часом. Хвильова функція в квазікласичному наближенні. Метод Вентцеля-Крамерса-Бріллюена. Правило квантування Бора-Зоммерфельда. Приклад гармонічного осцилятора. Квантова механіка і інтеграли по траєкторіях.

6. Момент кількості руху

Оператор повороту і орбітальний момент кількості руху. Власні значення і власні функції операторів квадрата та проєкцій моменту кількості руху. Власні функції операторів квадрата та проєкцій орбітального моменту кількості руху.

Рух частинки в центральній-симетричному полі та теорія збурень

7. Рух частинки в центральній-симетричному полі

Рух в полі центральної сили. Радіальне рівняння Шредінгера. Рух в кулонівському полі. Атом водню. Атом водню. Інтеграл руху Лапласа-Рунге-Ленца (метод В. Паулі).

8. Теорія збурень

Стаціонарна теорія збурень. Невироджений випадок. (Ангармонічні осцилятори. Моделі з малими параметрами створеними «з нічого» $1/N$ -розклади). Ефективна маса домішок в конденсованих тілах. Модель з неаналітичною залежністю енергії від константи взаємодії: надпровідник Бардіна-Купера-Шріффера.

Теорія збурень при наявності виродження. Дворівнева система. Ефект Штарка для атома водню.

Енергетичні рівні електрона в кристалі. Варіаційний метод. (Ангармонічний осцилятор).

Теорія збурень, залежних від часу. Ймовірність квантового переходу за одиницю часу. Золоте правило Фермі. Дифракція нейтронів в рідинах та твердих тілах. Квантові переходи під дією раптових збурень.

X. ТЕРМОДИНАМІКА І СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА

Начала термодинаміки та основні принципи статистичної фізики

Термодинаміка і статистична фізика як макроскопічна та мікроскопічна теорії теплової форми руху матерії відповідно. Феноменологічний метод термодинаміки і мікроскопічний метод статистичної механіки. Основні етапи розвитку теорії теплових явищ.

1. Начала та основні співвідношення термодинаміки

Перше і друге начала термодинаміки. Характеристичні функції. Співвідношення Максвелла та рівняння Гіббса-Гельмгольца в термодинаміці. Теплова теорема Нернста. Третє начало термодинаміки.

Співвідношення термодинаміки для систем зі змінним числом частинок. Загальні умови рівноваги та стійкості рівноваги термодинамічних систем. Умови стійкості рівноваги як умови для

термічного та калоричного рівнянь стану. Умови рівноваги та стійкості рівноваги для критичної точки. Умови рівноваги в багатофазних багатокомпонентних системах. Правило фаз Гіббса.

2. Фазові переходи та критичні явища

Класифікація Еренфеста фазових переходів. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса для фазових переходів I роду. Правило Максвела при фазових переходах I роду. Рівняння Еренфеста фазових переходів II роду. Фазовий перехід в надпровідний стан у відсутності магнітного поля.

Напівфеноменологічна теорія фазових переходів Ландау. Поведінка речовини в околі критичної точки. Поняття про критичні індекси. Критичні індекси в теорії Ван-дер-Ваальса та теорії молекулярного поля.

3. Принципи та основні співвідношення статистичної механіки

Основні принципи статистичної механіки: рівноважний стан, релаксація, опис макростану; мікростан, постулат однакових імовірностей, опис мікростану в класичній механіці, опис мікростану в квантовій механіці; ансамбль, середнє по ансамблю, функція розподілу, статистичний оператор.

Функція розподілу класичних ансамблів: теорема Ліувілля; квазізамкнена підсистема і її функція розподілу; роль інтеграла енергії та функція розподілу мікроканонічного ансамблю.

Статистичний оператор квантових ансамблів: рівняння руху; статистичний оператор квазізамкненої підсистеми; функція розподілу квантового мікроканонічного ансамблю.

Статистична термодинаміка

4. Термодинамічні характеристики в методі статистико-механічного опису теплових явищ

Функція розподілу ймовірностей для енергії системи. Статистична вага. Ентропія і температура в статистичній механіці. Ентропія і друге начало термодинаміки. Класичний канонічний ансамбль. Квантовий канонічний ансамбль. Термодинамічна еквівалентність ансамблів. Вільна енергія в статистичній механіці. Зв'язок з термодинамікою.

Статистична сума і статистичний інтеграл. Основне співвідношення статистичної механіки. Функція розподілу великого канонічного ансамблю (класичного та квантового). Статистичний інтеграл класичного ідеального газу з постійним та зі змінним числом частинок.

5. Статистична термодинаміка класичних слабонеідеальних систем частинок.

Слабо неідеальний класичний газ з нейтральних частинок. Віріальний розклад та рівняння Ван-дер-Ваальса. Теорія Дебая класичної слабонеідеальної плазми. Метод кореляційних функцій Боголюбова: ланцюг рівнянь та наближені методи розв'язку.

6. Статистична термодинаміка ідеальних квантових систем

Ідеальні квантові гази. Розподіл Фермі. Розподіл Бозе.

Температура виродження газів. Ідеальний Фермі-газ при $T=0$ К. Сильновироджений газ Фермі: хімічний потенціал, енергія, ентропія, теплоємність. Слабовироджений газ Фермі. Ідеальний бозе-газ та явище бозе-конденсації.

Спектральна густина рівноважного випромінювання, її універсальність. Формула Планка для спектральної густини рівноважного випромінювання. Термодинамічні характеристики рівноважного випромінювання. Закон Стефана-Больцмана для рівноважного випромінювання.

Теорія Айнштейна та Дебая теплоємності твердих тіл. Від'ємні температури для систем з обмеженим енергетичним спектром.

Теорія флюктуацій

7. Термодинамічна теорія флюктуацій

Друге начало термодинаміки для неквазістатичних процесів. Термодинамічні флюктуації. Теорія Айнштейна для флюктуацій у замкнених ізольованих системах. Розподіл Гауса для малих флюктуацій. Малі флюктуації в неізольованій системі. Приклади флюктуацій і кореляції флюктуацій.

Застосування канонічного та великого канонічного ансамблів до розрахунку флюктуацій. Флюктуації чисел заповнення для фермі-газу. Флюктуації чисел заповнення для бозе-газу. Флюктуації густини класичних газів. Розсіяння світла на флюктуаціях густини.

8. Теорія браунівського руху

Загальні характеристики браунівського руху. Теорія Айнштейна браунівського руху. Теорія Ланжевена. Просторові та часові масштаби механіки браунівського руху.

Випадкова сила та ідея огрублення часової шкали. Імпульс браунівської частинки, його дисперсія та вищі моменти. Координата браунівської частинки, її дисперсія та вищі моменти. Опис браунівського руху як випадкового процесу.

Термодинаміка необоротних процесів і елементи фізичної кінетики.

9. Теорія Онзагера необоротних процесів

Термодинамічні сили і потоки. Кінетичні коефіцієнти та рівняння Онзагера для необоротних процесів. Виробництво ентропії. Властивості кінетичних коефіцієнтів. Співвідношення Онзагера. Кінетичні коефіцієнти для дифузії, теплопровідності. Дифузійного переносу тепла та термодифузії.

10. Елементи фізичної кінетики

Рівняння Ліувілля в статистичній механіці необоротних процесів. Кінетичне рівняння для одночастинкової функції розподілу. Інтеграл зіткнень.

Кінетичне рівняння у наближенні часу релаксації. Ланцюг рівнянь Боголюбова та фізичні ідеї його аналізу. Кінетичне рівняння Больцмана. Н-теорема Больцмана. Необоротність як результат огрублення часової шкали. Застосування кінетичного рівняння у наближенні часу релаксації до явищ електро- та теплопровідності.

XI. РІВНЯННЯ І МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОЇ ФІЗИКИ

Векторний аналіз

Прямокутні системи координат

Перетворення прямокутних координат точки при перетвореннях систем координат. Властивості коефіцієнтів перетворення. Перетворення компонент вектора при переході від однієї прямокутної системи координат до іншої.

Елементи векторної алгебри. Полярні та аксіальні вектори. Псевдовеличини.

Основи векторного аналізу

Вектор-функція скалярного аргументу. Диференціювання та інтегрування вектор-функцій за скалярним аргументом. Годограф. Скалярне поле. Поверхні та лінії рівня. Похідна від скалярної функції за напрямком. Градієнт скалярного поля та його властивості. Потік векторного поля через поверхню. Дивергенція векторного поля та її властивості. Теорема Остроградського-Гауса, теорема про градієнт. Лінійний інтеграл від векторного поля. Потенціальне векторне поле.

Ротор вектора та його властивості. Теорема Стокса, теорема про ротор. Соленоїдальні векторні поля. Диференціальні операції другого порядку. Теорема про розклад (теорема Гельмгольца).

Тензорний аналіз

3. Косокутні системи координат

Косокутні системи координат. Узагальнені проекції та узагальнені складові вектора. Масштабні та дуальні вектори. Метричний тензор в косокутних координатах. Скалярний і векторний добутки в косокутних координатах. Піднімання і опускання індексів. Правила індексів, приклади їхнього застосування. Перетворення координат і компонент вектора при переході від однієї косокутної системи координат до іншої.

4. Тензори та їх властивості

Перетворення векторів при зміні базису. Полілінійні форми. Тензори. Ранг тензора. Перетворення тензорів при перетворенні систем координат. Алгебраїчні операції над тензорами (додавання, множення, згортка, піднімання та опускання індексів). Трансформаційні властивості компонент метричного тензора при переході від однієї до іншої системи координат. Властивості тензорів 2-го рангу. Подвійна згортка добутку симетричного і антисиметричного тензорів 2-го рангу. Диференціальні операції над тензорами у косокутних координатах. Векторна дивергенція тензора.

Криволінійні системи координат

Криволінійні системи координат. Масштабні та дуальні вектори у криволінійних системах координат. Локальний базис. Ортогональні системи координат. Коефіцієнти Ламе.

Метричний тензор у криволінійних координатах. Ко- і контраваріантні метричні тензори. Метричні тензори для ортогональних систем координат. Метричні тензори для циліндричних та

сферичних координат. Перетворення криволінійних координат. Тензори в криволінійних системах координат.

Метричні простори. Задача про паралельне перенесення вектора. Символи Крістоффеля. Класифікація просторів. Коваріантне диференціювання. Диференціальні операції в метричних просторах.

Теорія функцій комплексної змінної

Короткий історичний огляд еволюції зв'язків між фізикою і математикою.

1. Функції комплексної змінної

Комплексна змінна. Модуль та аргумент. Означення функції комплексної змінної. Похідна функції комплексної змінної. Диференційованість і аналітичність. Умови Даламбера–Ейлера–Коші–Рімана. Однозначні та багатозначні функції. Точки розгалуження багатозначних функцій.

2. Інтеграл від функції комплексної змінної

Інтегрування однозначних функцій. Теореми Коші. Теорема Морери. Інтегральна формула Коші та її наслідки, інтеграл типу Коші. Інтегрування багатозначних функцій. Функціональні ряди. Теорема про рівномірну збіжність функціональних рядів. Степеневі ряди. Ряди Тейлора. Теореми про степеневі ряди. Ряди Лорана. Область збіжності.

3. Лишки в особливих точках

Означення ізольованої особливої точки функції комплексної змінної та їх класифікація. Теореми про зв'язок характеру особливої точки зі структурою ряду Лорана. Означення лишку в особливі точки. Аналітичне продовження. Ріманові поверхні. Конформні відображення. Застосування теорії лишків. Обчислення означених інтегралів. Лема Жордана.

Операційне числення Узагальнені функції.

Тема 4. Інтегральне перетворення Лапласа

Пряме і обернене інтегральне перетворення Лапласа. Межі застосовності. Властивості перетворення Лапласа. Диференціювання та інтегрування функцій-оригіналів та їх зображення. Інтеграл Дюгамеля. Теорема множення Бореля. Згортка функцій. Зображення добутку функцій. Застосовування перетворення Лапласа до розв'язування звичайних лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами, поліноміальними коефіцієнтами.

Тема 5. Інші інтегральні перетворення

Пряме і обернене перетворення Фур'є. Межі застосовності. Властивості перетворення Фур'є. Зв'язок з перетворенням Лапласа. Синус-, косинус-перетворення Фур'є. Властивості. Перетворення Мелліна. Зв'язок з перетворенням Лапласа.

Тема 6. Узагальнені функції

δ -функція Дірака. δ -функційні послідовності.

Функціональні простори. Основні та узагальнені функції. Носій узагальненої функції. Дії над узагальненими функціями. Диференціювання узагальнених функцій. Функція Гевісайда. Формули Сохоцького. Прямий добуток і згортка узагальнених функцій. Перетворення Фур'є, Лапласа узагальнених функцій.

Диференціальні рівняння з частинними похідними другого порядку

7. Диференціальні рівняння з частинними похідними другого порядку з двома незалежними змінними

Класифікація диференціальних рівнянь з n -незалежними змінними в точці. Характеристичні поверхні. Класифікація диференціальних рівнянь з двома незалежними змінними в точці. Характеристичне рівняння. Канонічна форма рівнянь. Рівняння коливальних. Рівняння теплопровідності. Стаціонарні рівняння. Крайові задачі і їх класифікація. Типи граничних умов. Коректне формулювання крайових задач.

8. Крайові задачі для рівнянь гіперболічного і параболічного типу

Рівняння коливальних на нескінченій прямій. Формула Даламбера. Метод характеристик для хвильового рівняння. Сферичні хвилі. Задача з даними на характеристиках. Метод відокремлення змінних для однорідного і неоднорідного рівняння коливальних. Задача Штурма–Ліувілля. Властивості власних функцій і власних значень. Крайова задача з неоднорідними граничними умовами. Метод відокремлення змінних для рівняння теплопровідності з граничними умовами III роду. Методи

функцій Гріна в задачі Коші для однорідного і неоднорідного рівняння теплопровідності. Змішана крайова задача для рівняння теплопровідності з неоднорідними граничними умовами. Принцип Дюгамеля.

9. Крайові задачі для рівнянь еліптичного типу

Гармонічні функції і їх властивості. Метод функцій Гріна розв'язування крайових задач для рівнянь еліптичного типу. Властивості функцій Гріна. Знаходження функцій Гріна методом конформного відображення для рівняння Лапласа на площині. Об'ємні і поверхневі потенціали. Застосування потенціалів до розв'язування крайових задач.

Спеціальні функції. Варіаційне числення

10. Циліндричні функції

Загальне рівняння для спеціальних функцій. Лема про асимптотичну поведінку розв'язків. Задача Штурма–Ліувілля для круга. Рівняння Бесселя. Функції Бесселя. Ортонормованість. Функцій Ноймана. Функції Ганкеля. Функції Бесселя і Ганкеля уявного аргумента. Асимптотичне представлення циліндричних функцій.

Ортогональні многочлени

Твірна функція для многочленів Лежандра. Розклад твірної функції у степеневий ряд. Формула Родрига. Рівняння для многочленів Лежандра. Рекурентні співвідношення. Ортонормованість. Твірна функція для многочленів Ерміта. Розклад в системний ряд твірної функції. Рекурентні співвідношення. Рівняння для многочленів Ерміта. Ортонормованість многочленів Ерміта. Функції Ерміта. Твірна функція для многочленів Лагерра. Розклад твірної функції у степеневий ряд. Рекурентні співвідношення. Рівняння для многочленів Лагерра. Ортонормованість. Функції Лагерра.

Розв'язування рівняння Лапласа у сферичних координатах методом відокремлення змінних. Приєднані функції Лежандра. Ортонормованість функцій Лежандра. Сферичні функції. Ортонормованість сферичних функцій. Гармонічний осцилятор. Рух електрона в кулонівському полі.

12. Варіаційні задачі

Варіаційні принципи в фізиці. Задача про брахістохрону. Абсолютний і відносний екстремум функціонала. Варіаційна похідна. Варіаційна задача з закріпленими кінцями. Рівняння Ейлера. Функціонали з вищими похідними. Рівняння Ейлера–Пуассона. Екстремум подвійного інтеграла. Рівняння Отроградського. Узагальнення на випадок вищих похідних.

Ізопериметрична задача. Множники Лагранжа. Загальна форма першої варіації. Друга варіація.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гаральд Іро. Класична механіка. Пер. з нім. – Львів, 1999.
2. М.В.Ваврух, С.В.Смеречинський, О.М.Стельмах, Н.Л.Тишко. Збірник задач з механіки. Навчальний посібник. - Львів: “Растр-7”, 2017.
3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Том 1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – Київ: “Техніка”, 1999.

1. Клим М.М., Якібчук П.М. Молекулярна фізика. – Львів: Львівський національний у-т, 2003. – 544 с.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.: Техніка, 1999. – 536 с.
3. Дугчак Я.Й. Молекулярна фізика./ П.М.Якібчук. - К., 1991, 348 с
4. Клим М. М. Збірник задач з молекулярної фізики. Навчальний посібник./ Клим М. М., Якібчук П. М. – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, , 2009 – 242 с.
5. Якібчук П. М. Збірник задач з молекулярної фізики. Навчальний посібник./ Якіб- чук П. М., Королишин А.В. – Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, , 2009 – 130 с.

1. Курс фізики. У книзі 1. Електрика і магнетизм: навч. посіб. / Г. В. Бушок, Г. В. Півень, В. В. Левандовський; за заг. ред. І. Кучерука. – К. : Техніка, 2001. – 446 с. – ISBN 966-575-183-2.
2. Воловик П. М. Фізика: Для університетів: підручник. / П.М.Воловик. – К.; Ірпінь: Перун, 2005. – 8
3. Загальний курс фізики. У 3 ч. Ч.2. Електрика і магнетизм : навч. посіб. / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик ; за заг. ред. І. Кучерука. – К. : Техніка, 2001. – 452 с.– ISBN 966-575-183-2.
4. Загальний курс фізики. Збірник задач: навч. посіб./ І. П. Гаркуша, І. Т. Горбачук [та ін.]; за ред. І. Ё. Гаркуші. – К. : В-во "Техніка", 2003. – 560 с. – ISBN 966-575-130-1.
5. Венгреневич Р. Д. Курс фізики. У 3-х ч. Ч.2. Електрика та магнетизм : навч. посіб. / Р. Д. Венгреневич, М. Ю. Стасик; за ред. проф. Р.Д. Венгреневича. – Чернівці: Видавничий дім "Букрек", 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-399-124-5.
6. Курс фізики. У 2 т. Т.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм: навч. посіб. / за заг. ред. Г
7. Антоняк О.Т. Загальна фізика. Основи електрики і магнетизму: навч. посіб. / О.Т. Антоняк. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І.Франка, 2009. – 239 с. – ISBN 978-966-613-664-3.
8. Загальна фізика : лабораторний практикум: навч. посіб. / В. Барановський, П.Бережний, І.Горбачук, В.Дущенко, М.Шут; за заг. ред. І.Т.Горбачука. – К.: Вища шк., 1992. – 509 с. – ISBN 5-11-002569-X
9. Готра З. Ю. Фізичні основи електронної техніки / З. Ю. Готра, І. Є. Лопатинський, Б. А. Лукіянець, З. М. Микитюк, І. В. Петрович. – Львів : Бескид Біт, 2004.– 880 с.
10. Болеста І.М. Теорія електромагнітного поля : навчальний посібник / Болеста І.М. – Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2013 – 478 с.

К

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. Горбань І.С. Оптика. – К.: Вища школа. 1979.
3. Кучерук І.Н. Горбачук І.Г. Загальний курс фізики. Т.3. – К.: Техніка. 1999.
4. Білий М.У., Скубенко А.Ф. Загальна фізика. Оптика. – К.: Вища школа. 1987.
5. Задачі з оптики : навч. Посібник / І.П. Пашук, А.С. Волошиновський А.С., В.В. Вістовський ; за ред. проф. М.О. Романюка. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2020. – 326 с.
6. М.Колінько, І.Пашук, І.Стефанський. Оптичний практикум. Ч.1 та ч. 2. – Львів: ЛНУ, 2000, 2004.

д

ь

,

1. Білий М.У. Атомна фізика. Київ. 1973.
2. Гайда Р.П. Атомна фізика. Львів. 1965.
3. Глауберман А.Ю. Фізика атома та квантова механіка. Київ. 1972.
4. А.А. Остроухов. Розв'язування задач з загального курсу фізики. К: Вища школа. 1986.
5. В.Ю. Курляк, Л.Т. Карплюк, М.Р. Тузяк. Практикум з курсу «Атомна фізика». – Львів: Вид. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. – 112 с.
6. А.В. Франів, О.В. Бовгира. Задачі з атомної фізики. – Львів: Вид. центр ЛНУ, 2011. – 210 с.

- О.Г. Ситенко, В.К. Тартаковський. Теорія ядра: Навч. посібник.- Київ.: Либідь, 2000.-608 с.
- Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. Т.3. Оптика. Квантова фізика. К.: Техніка, 1999.- 520 с.
3. Л.А. Булавин, В.К. Тартаковський. Ядерна фізика.- Київ, 2005.-480 с.
 - Чолпан П.П. Фізика. К.: Вища школа, 2003.-567 с.
 5. Ніцук Ю.А. Ядерна фізика: Навч. посібник.- Одеса.: Видавництво ОДУ, 2008.- 168 с
 6. А.К. Вальтер, І.І. Залюбовський. Ядерна фізика.- Харків: Видавництво Харківського ун-ту, 1991.- 480 с.
 7. В. Капустяник, Б. Кулик, М. Партика. Практикум з ядерної фізики для студентів фізичного факультету.- Львів: Видавн. центр фіз. ф-ту ЛНУ ім. І. Франка, 2012.-88 с

1. А. Ю. Глауберман, М. Т. Сеньків. Теоретична механіка. Львів, 1960, 220 с.
2. А. М. Федорченко. Теоретична механіка. Київ: “Вища школа”, 1975, 516 с.
3. Гаральд Іро. Класична Механіка, Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 1999, 464с.
4. С. М. Єжов, М. В. Макарець, О. В. Романенко, Класична механіка, Київ: вид-во “Київський університет”, 2008, 480с.
5. Збірник задач з теоретичної механіки / М. В. Блажівська, А. А. Ровенчак, Н. А. Сідлецька, М. М. Стецко, В. М. Ткачук, Т. В. Фітьо. Львів, ЛНУ ім. І. Франка, 2011. - 68с.

- В. А. Головацький. Електродинаміка: навчальний посібник. Чернівці: Рута, 2011.
2. В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко, Л. В. Сібрук, Теорія електромагнітного поля. Київ: НАУ, 2017.
 3. Збірник задач з електродинаміки / М. В. Блажівська, О. І. Григорчак, Ю. С. Криницький та ін. ; за ред. Ю. С. Криницького та А. А. Ровенчака. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2015. 112 стор.
 - 4
 - А. М. Федорченко. Теоретична механіка. Київ: Вид-во КНУ імені Тараса Шевченка, 2003.

9

- Вакарчук І. О., Квантова механіка (видання четверте, доповнене).Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 стор. <http://www.ktf.franko.lviv.ua/personal/vakarchuk.html>
2. Юхновський І. Р. Квантова механіка. К., 1995.
 3. Глауберман А. Ю. Квантова механіка. Львів, 1962.
 4. І. О. Вакарчук, Т. В. Кулій, О. В. Кнігініцький, В. М. Ткачук. Збірник задач з квантової механіки. Львів, 1996.
 5. Ткачук В. М. Фундаментальні проблеми квантової механіки. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 144 с. (1-й розділ).

10

1. Єрмолаєв О.М., Раба Г.І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки.-Харків: ХНУ, 2004.
2. Кобилянський В.Б. Статистична фізика. – К.: Вища школа, 1972.
3. Вакарчук І. О., Кнігініцький О. В., Попель О.М., Кулій Т. В. Збірник задач з термодинаміки і статистичної фізики. – Львів: ЛНУ, 1998.

4. Федорченко А. М. Квантова механіка, термодинаміка і статистична фізика // Теоретична фізика. – К. : Вища школа, 1993. – Т. 2. – 415 с.
. Кобилянський В. Б. Методичні вказівки до розв'язування задач з термодинаміки (метод характеристичних функцій). – Львів: ЛДУ, 1985.

1. М. Т. Сеньків, Векторний і тензорний аналіз. Львів: вид-во Львів. ун-ту, 1990, 148 с.
2. С.М. Гребенюк, Ю.М. Стреляєв, М. І. Клименко. Тензорний аналіз. — Запоріжжя: ЗНУ, 2015. — 90с. М. Т. Сеньків, Векторний і тензорний аналіз. Львів: вид-во Львів. ун-ту, 1990, 148 с.
3. Зіненко С.М. Векторний і тензорний аналіз.— Скалярні й векторні поля. Навчальний посібник. — Харків: ХНУ, 2014.
4. С. С. Піх, О. М. Попель, А. А. Ровенчак, І. І. Тальянський. Методи математичної фізики.— Л., ЛНУ імені Івана Франка.— 2011.
5. С. С. Піх, А. А. Ровенчак, Ю. С. Криницький. 1001 задача з математичної фізики.— Л., ЛНУ імені Івана Франка.— 2006.
6. Піх С. С. Методичні рекомендації до проведення практичних занять із курсу “Методи математичної фізики”. Ч. 1, Ч. 2. Теорія функції комплексної змінної.— Львів: Львівський національний університет ім. І. Франка.
7. Тальянський І. І. Методи математичної фізики. Тексти лекцій. Львів. Національний ун-т ім. Івана Франка.— Львів.— 1996.
8. Доценко І. С., Якименко О.І. Методи математичної фізики: методичний посібник для студентів фізичного факультету. – К.: ВПЦ «Київський університет». – 2007.