Міністерство освіти і науки України

Львівський національний університет імені Івана Франка

Затверджено
на засіданні приймальної комісії
Львівського національного університету
імені Івана Франка
28.03.2025 р. (протокол № 80/3)

В. о. ректора _____ Володимир МЕЛЬНИК

ПРОГРАМА
фахового вступного іспиту
для здобуття третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
доктора філософії

Спеціальність – Е6 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Освітньо-наукова програма – «Прикладна фізика та наноматеріали»

Фізичний факультет

Львів 2025

ПРОГРАМА
фахового вступного випробовування зі спеціальності для здобуття наукового ступеня доктора філософії у Львівському національному університеті імені Івана Франка

Науковий ступінь: доктор філософії за спеціальністю **Е6 Прикладна фізика та наноматеріали**.
Напрями: **фізика напівпровідників і діелектриків,**
фізика металів.

АНОТАЦІЯ

Дисципліни, зміст яких входить до програми вступного іспиту, належать до циклу дисциплін **загальної фізики:**

«Механіка», «Молекулярна фізика», «Електрика та магнетизм», «Оптика», «Атомна фізика», «Фізика ядра та елементарних частинок»;

теоретичної фізики:

«Теоретична механіка», «Електродинаміка», «Квантова механіка», «Статистична фізика»,

та дисциплін **спеціальної підготовки**:

«Фізика нанорозмірних об'єктів», «Прикладна спектроскопія», «Методи дослідження структури та властивостей матеріалів», «Моделювання фізичних властивостей кристалів та наноматеріалів», «Фізика низьких температур».

Метою проведення вступного іспиту є перевірка навичок та вмінь вступників щодо визначення фізичних характеристик процесів, знання основних принципів і законів фізики та їх математичного вигляду, методів спостереження і експериментального дослідження основних фізичних явищ; наявність уявлення про межі застосування фізичних моделей і теорій. Вступники повинні знати фундаментальні закони фізики, вміти застосовувати ці знання при розгляді окремих явищ, поєднувати їх фізичну суть з аналітичними співвідношеннями.

Вступне випробування відбувається відповідно до затвердженого розкладу у вигляді письмового іспиту. Спосіб проведення іспиту, структура оцінки та критерії оцінювання описані в останньому розділі цієї Програми.

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

МЕХАНІКА

Механіка матеріальної точки. Характеристики руху: траєкторія, переміщення, швидкість, прискорення, маса, сила, кількість руху. Опис руху матеріальної точки в декартових координатах, полярних, циліндричних. Тангенціальне і нормальне прискорення точки.

Основні постулати Ньютона. Перші інтеграли рівнянь руху Ньютона. Закони збереження енергії, імпульсу, моменту імпульсу.

Коливальний рух. Рух матеріальної точки під дією квазіпружної сили. Власні коливання гармонійного осцилятора, вплив тертя та зовнішньої періодичної сили. Плоский математичний маятник: малі коливання; коливання з довільною амплітудою. Двовимірний гармонійний осцилятор. Фігури Лісажу.

Рух матеріальної точки в полі центральних сил. Закони Кеплера. Рух природних і штучних тіл в полі гравітуючих мас. Ієрархія космічних швидкостей.

Принцип відносності Галілея. Еквівалентність інерційних систем відліку. Інваріантність законів механіки в інерційних системах. Неінерційні системи відліку, що рухаються прямолінійно. Сили інерції. Опис руху тіла в обертових неінерційних системах. Відцентрова сила інерції, сила Коріоліса. Приклади прояву сил Коріоліса при русі тіл відносно поверхні Землі.

Основи спеціальної теорії відносності. Постулати Айнштайна. Перетворення Лоренца. Зміна масштабів і тривалості проміжків часу між подіями. Правило перетворення швидкостей. Рівняння руху релятивістської матеріальної точки.

Механіка системи двох матеріальних точок. Центр мас. Система центра мас та її застосування. Розділення рухів: рух центра мас, відносний рух. Фізичні величини в системі центра мас. Імпульс системи. Повна енергія системи. Момент імпульсу.

Обертання матеріальної точки навколо осі. Кутова швидкість, кутове прискорення, момент інерції. Модель твердого тіла - система жорстко зв’язаних матеріальних точок. Обертання системи матеріальних точок навколо нерухомої осі. Момент інерції. Теорема Гюйгенса – Штейнера.

Загальний випадок обертання твердого тіла навколо центра мас. Тензор інерції. Головні моменти тензора інерції. Головні осі інерції. Гіроскопи: властивості, застосування в техніці. Стійкість обертального руху гіроскопа. Пара сил. Гіроскопічний ефект. Прецесія. Кутова швидкість прецесії. Нутація.

Сили в механіці: гравітаційні сили, сили тертя і сили пружності. Закон всесвітнього тяжіння. Визначення гравітаційної сталої. Гравітаційна та інертна маса.

Механіка рідин і газів. Тиск у рідинах і газах. Закон Паскаля. Закон Архімеда. Ідеальна рідина. Рівняння неперервності. Рівняння Бернуллі. Рух в’язкої рідини. В’язкість. Формула Пуазейля. Ламінарний та турбулентний рух рідини. Число Рейнольдса. Рух тіл у рідинах і газах.

Сили тертя, сили пружності і деформації. Сили тертя, в’язке тертя. Сили пружності. Основні види деформацій. Закон Гука. Пружні властивості реальних тіл. Енергія пружної деформації.

Пружні хвилі. Поширення хвиль. Рівняння хвиль. Поздовжні та поперечні хвилі. Розподіл швидкостей і деформацій у хвилі. Енергія хвильового руху. Стоячі хвилі, залежність довжини хвилі від розміру коливної системи, роль граничних умов.

Елементи акустики. Природа звуку. Поширення звукових хвиль. Інтенсивність звуку. Сприймання звуку. Джерела звуку. Ефект Доплера. Ударні хвилі. Ультразвук та його застосування. Інфразвуки в природі.

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

Молекулярно-кінетична теорія ідеальних газів**.** Розподіл молекул за швидкостями. Функція розподілу. Закон розподілу швидкостей Максвела. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеальних газів. Рівняння стану ідеального газу. Основні закони ідеального газу. Розподіл Больцмана. Розподіл Максвела-Больцмана. Броунівський рух.

Кінематичні характеристики молекулярного руху**.** Довжина вільного пробігу молекул газу. Газокінетичний ефективний переріз. Частота зіткнень. Середня довжина вільного пробігу молекул у заданому напрямку після останнього зіткнення.

Основи термодинаміки**.** Основні поняття та означення. Ступені вільності молекул. Розподіл енергії за ступенями вільності. Внутрішня енергія ідеального газу. Макроскопічна робота. Теплота. Перший закон термодинаміки. Теплоємність ідеального газу. Температурна залежність теплоємності газів. Політропний процес. Рівняння політропи. Адіабатний процес. Рівняння Пуассона. Оборотні і необоротні процеси. Другий закон термодинаміки. Цикл Карно та його коефіцієнт корисної дії. Теореми Карно. Абсолютна термодинамічна шкала температур. Інтеграл Клаузіуса. Ентропія. Зміна ентропії в ізольованих термодинамічних системах. Термодинамічна ймовірність. Зв’язок ентропії з імовірністю стану системи. Формула Больцмана. Теорема Нернста. Третій закон термодинаміки. Недосяжність абсолютного нуля температур.

Реальні гази**.** Сили міжмолекулярної взаємодії в газах. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Критичний стан речовини. Гравітаційний ефект. Внутрішня енергія реального газу. Закон відповідних станів. Ефект Джоуля-Томсона. Зрідження газів. Сучасні методи одержання низьких температур.

Явища перенесення в газах**.** Механізми явищ перенесення. Дифузія, теплопровідність, внутрішнє тертя (в’язкість) у газах. Коефіцієнти явищ перенесення у газах.

Рідкий стан речовини**.** Сучасні уявлення про будову рідин. Ближній порядок рідин. Функція радіального розподілу. В’язкість рідин. Поверхневий шар рідини. Поверхневий натяг. Формула Лапласа. Змочування та капілярні явища. Поверхнево-активні речовини. Рідкі розчини. Закони Рауля. Осмотичний тиск. Закон Вант-Гоффа. Рідкі кристали.

Будова та властивості твердих тіл**.** Сили зв’язку у твердих тілах. Елементи симетрії кристалів. Гратки Браве. Кристалографічні класи та сингонії. Індекси Міллера. Дефекти в реальних твердих тілах. Теорія теплоємності кристалів Дюлонга-Пті, Айнштайна, Дебая. Температура Дебая.

Фазові перетворення. Поняття фази. Фазові переходи першого роду. Рівняння Клапейрона-Клаузіуса. Крива фазової рівноваги. Діаграма станів однокомпонентної речовини. Фазові переходи другого роду. Рідкий гелій.

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

Електростатика. Електричний заряд. Закон збереження електричного заряду. Закон Кулона. Принцип суперпозиції. Напруженість. Теорема Гауса. Потенціальність електростатичного поля. Скалярний потенціал.

Електричний диполь. Поляризація полярних та неполярних діелектриків. Поляризованість. Формула Клаузіуса-Мосотті. Теорема Гауса для електростатичного поля в діелектриках. Вектор електричної індукції. Граничні умови для електричного поля. П’єзоелектрики, піроелектрики, сегнетоелектрики.

Енергія електричного поля. Густина енергії електричного поля.

Постійний електричний струм. Природа електричного струму. Рівняння неперервності. Диференційна форма закону Ома та закону Джоуля-Ленца.

Електропровідність. Класична теорія електропровідності. Ефект Холла.

Власна та домішкова провідність напівпровідників.Провідність металів. Надпровідність.

Контактні явища, p-n-перехід. Напівпровідниковий діод та транзистор. Термоелектричні явища.

Електропровідність електролітів. Електроліз.

Електропровідність газів. Іонізація та рекомбінація іонів. Види газового розряду. Плазма. Термоелектронна емісія. Формула Річардсона.

Стаціонарне магнітне поле. Магнітна взаємодія струмів. Закон Біо-Савара-Лапласа. Теорема про циркуляцію вектора магнітної індукції. Теорема Гауса для магнітного поля. Векторний потенціал. Магнітний дипольний момент струму.

Дія магнітного поля на струм. Сила Лоренца. Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях.

Магнітне поле в речовині. Намагнічування речовини. Вектор намагнічування. Напруженість магнітного поля. Циркуляція вектора напруженості поля у магнетику. Граничні умови для магнітного поля. Ларморова прецесія. Діа-, пара- та феромагнетизм. Антиферомагнетики та ферити.

Енергія магнітного поля. Густина енергії магнітного поля.

Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції. Взаємо- та самоіндукція.

Квазістаціонарний змінний струм. Коло змінного струму. Метод комплексних амплітуд та векторних діаграм. Імпеданс.

Вимушені електричні коливання в колах змінного струму. Резонанси. Вільні електричні коливання в контурі.

Робота і потужність струму. Скін-ефект.

Система рівнянь Максвела та їх фізичний зміст. Електромагнітні хвилі. Густина енергії електромагнітного поля. Вектор Умова - Пойнтінга. Розповсюдження електромагнітних хвиль в середовищі, яке проводить електричний струм. Поглинання електромагнітних хвиль.

ОПТИКА

Електромагнітна теорія світла. Швидкість світла. Методи визначення швидкості світла. Фазова і групова швидкість світла в речовині. Випромінювання Вавілова-Черенкова.

Принцип Ферма та основні закони геометричної оптики. Заломлення променів на сферичній поверхні. Лінзи. Оптичні системи мікроскопа і телескопа.

Інтерференція світла. Когерентність. Просторова і часова когерентність. Експериментальне здійснення інтерференції світла. Інтерференційні спектральні прилади. Основи голографії.

Дифракція. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракція Френзеля (круглий отвір, край екрану). Дифракція в паралельних променях. Дифракційна гратка і її застосування. Дифракція рентгенівських променів. Дифракція на просторовій гратці. Роздільна здатність мікроскопа і телескопа.

Поляризація світла. Поляризація при відбиванні та заломленні на межі діелектрика. Подвійне променезаломлення. Обертання площини поляризації Штучне подвійне променезаломлення та його застосування. Інтерференція поляризованих променів. Поляризаційні прилади. Еліптична поляризація. Пластинка в чверть довжини хвилі, половину довжини хвилі, компенсатори. Фазові пластинки.

Взаємодія світла з речовиною. Дисперсія світла. Нормальна і аномальна дисперсія. Методи спостереження. Застосування інтерферометра для спостереження аномальної дисперсії. Метод гаків Рождественського. Зв'язок між аномальною дисперсією та поглинанням. Електронна теорія дисперсії. Розсіяння світла. Комбінаційне розсіяння світла.

Оптична активність та циркулярний дихроїзм. Штучна анізотропія в електричному і магнітному полях. Фотопружність, ефекти Покельса, Кера. Явище Фарадея.

Теплове випромінювання. Закони Кірхгофа. Закон Стефана- Больцмана. Закон зсуву Віна. Труднощі класичної теорії випромінювання. Фотони. Формула Планка. Оптична пірометрія.

Фотоемісія металів і напівпровідників. Основні закони фотоефекту. Ефективні фотокатоди, фотоелементи й фотопомножувачі. Електрооптичні прискорювачі та перетворювачі. Фотопровідність напівпровідників.

Тиск світла. Роботи Лебедєва. Явище Комптона. Імпульс фотона.

Спонтанне і вимушене випромінювання. Люмінесценція і її види. Основні закони і застосування. Співвідношення Айнштайна. Принцип дії лазера. Основні властивості вимушеного випромінювання (монохроматичність, когерентність, направленість та ін.).

Оптика рухомих середовищ. Явище Доплера. Дослід Майкельсона. Елементи спеціальної теорії відносності.

Нелінійна оптика. Явище насичення поглинання у сильному світловому полі. Багатофотонне поглинання. Нелінійна поляризованість. Самофокусування. Самодифракція. Генерація гармонік вищого порядку.

АТОМНА ФІЗИКА

Хвильові властивості частинок речовини. Властивості хвиль де Бройля. Дифракція електронів, нейтронів, атомів та молекул на кристалах. Властивості хвиль де Бройля. Принцип суперпозиції. Принцип невизначеності Гайзенберга. Статистична інтерпретація хвиль де Бройля. Хвильові функції та їх фізичний зміст.

Постулати квантової механіки. Описання фізичних величин операторами. Оператори енергії і імпульсу. Середні значення фізичних величин.

Рівняння Шредінгера (часове та стаціонарне) і приклади його застосування. Частинка в потенціальній ямі. Власні значення і власні функції операторів фізичних величин, задача про осцилятор, тунелювання частинок крізь потенціальний бар'єр.

Будова атомів. Досліди Резерфорда по розсіянню α-частинок. Ядерна модель атома в рамках класичної механіки.

Теорія Бора. Квантова теорія атому водню. Квантові числа. Спектр атома водню. Визначення потенціалів збудження і іонізації.

Принцип Паулі. Електронні оболонки атомів. Періодична система елементів Менделєєва.

Типи зв'язків електронів в атомі. Зв'язок Рассел-Саундерса, зв'язок JJ. Визначення термів атомів для різних типів зв'язку.

Рентгенівські спектри атомів. Гальмівне та характеристичне випромінювання. Закон Мозлі. Тонка структура рентгенівських спектрів. Ефект Комптона.

Особливості оптичних спектрів складних атомів. Спін електрона. Векторна модель атома. Правила відбору при оптичних переходах. Спектри атомів з одним оптичним електроном (атоми лужних металів). Спектри та енергетичні рівні атомів з двома оптичними електронами. (атомів ртуті та гелію).

Магнітні властивості атомів: орбітальний та спіновий магнетизм. Магнетон Бора. Сумарний магнітний момент електронної оболонки. Фактор Ланде. Просторове квантування. Метод визначення атомних магнітних моментів. Ядерний магнетизм і надтонка структура спектральних ліній.

Вплив електричного і магнітного полів на атоми. Ефект Зеємана, Пашена-Бека, Штарка. Електронний спіновий і ядерний магнітний резонанси.

Обертальні і коливальні спектри молекул. Спектри двохатомних молекул.

Основи фізики твердого тіла. Класифікація твердих тіл за типами хімічного зв'язку. Кристалічна гратка.

Зонна теорія твердих тіл. Рівняння Шредінгера для кристала. Ефективна маса електрона. Метали, напівпровідники, діелектрики, напівметали.

ФІЗИКА ЯДРА ТА ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Будова атомного ядра. Енергія зв'язку і дефект маси. Основні властивості ядерних сил (радіус дії, властивості насичення, зарядова незалежність). Обмінний характер ядерних сил. Капельна модель ядра. Модель ядерних оболонок.

Виділення енергії при ядерних реакціях поділу та синтезу. Ланцюгові реакції. Перспективи здійснення керованих термоядерних реакцій. Проблема керованого термоядерного синтезу.

Взаємодія заряджених частинок і γ-квантів з речовиною. Іонізаційні і радіаційні втрати енергії, їх залежність від швидкості і маси частинок, властивості речовини. Проходження γ-квантів через речовину. Ефект Месбауера та його використання.

Дозиметрія. Одиниці дози в радіаційний фізиці.

Основні типи прискорювачів заряджених частинок. Методи реєстрації заряджених частинок.

Радіоактивний розпад, його закони. Радіоактивні ряди (сімейства). Нейтрино. Природна та штучна радіоактивність. Альфа-розпад і його квантово-механічна інтерпретація. Види β–розпаду.

Поняття про елементарні частини; їх властивості. Дивні частинки. Частинки і античастинки. Механізми взаємодії елементарних часток. Електромагнітна, сильна, слаба взаємодії. Кваркова модель. Об'єднана модель слабої та сильної електромагнітної взаємодії. Квантові числа елементарних частинок.

Космічні промені. Радіаційні пояси Землі.

ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА

ТЕОРЕТИЧНА МЕХАНІКА

1. Кінематика. Швидкість і прискорення в криволінійних координатах. Природній спосіб задання руху точки. Тангенціальне, нормальне прискорення. Радіус кривизни і кручення траєкторії.

2. Динаміка. Принцип Галілея. Закони Ньютона. Закони змін і збереження імпульсу, момент імпульсу і кінетичної енергії матеріальної точки. Закони зміни і збереження імпульсу, моменту імпульсу і кінетичної енергії системи матеріальних точок.

3. Інтегрування рівнянь Ньютона. Одномірний рух. Рух в центральному полі. Задача двох тіл. Задача Кеплера.

4. Рівняння Лагранжа I та II родів. Вязі. Класифікація вязей. Основна задача динаміки невільної точки. Принцип Даламбера. Рівняння Лагранжа I-го роду. Рівняння Лагранжа II-го роду. Узагальнена сила. Рівняння Лагранжа II-го роду для потенціальної сили. Лагранжіан. Узагальнений потенціал. Приклад електро-магнітного поля. Сили тертя. Дисипативна функція Релея.

5. Принцип найменшої дії. Деякі задачі варіаційного числення. Елементи варіаційного числення. Основні поняття варіаційного числення. Функціонал. Варіація функції. Варіація функціоналу. Рівняння Лагранжа-Ейлера для одної змінної. Узагальнення рівняння Лагранжа-Ейлера на випадок багатьох змінних. Варіаційний принцип Гамільтона і рівняння Лагранжа. Варіаційний принцип Гамільтона при наявності звязків. Коваріантність рівнянь Лагранжа. Закони збереження і їх звязок з властивостями простору і часу. Однорідність часу і закони збереження енергії. Однорідність простору і закон збереження імпульсу. Ізотропність простору і закон збереження моменту кількості руху. Теорема Неттер. Механічна подібність. Теорема віріала.

6. Канонічні рівняння. Рівняння Гамільтона. Функція Гамільтона. Функція Рауса. Дужки Пуасона. Властивості дужок Пуасона. Принцип Монертюі. Канонічні перетворення. Твірна функція канонічного перетворення. Інваріантність дужок Пуасона відносно канонічних перетворень. Рух системи як канонічне перетворення. Теорема Ліувіля. Інтегральні інваріанти Пуанкаре. Рух фазової рідини. Рівняння Ліувіля.

7. Теорія Гамільтона-Якобі. Дія як функція координат. Рівняння Гамільтона-Якобі. Теорема Якобі. Знаходження розв'язку задачі про рух механічної системи методом Гамільтона-Якобі. Метод розділення змінних в рівнянні Гамільтона-Якобі. Геометрична

інтерпретація дії. Рівняння Гамільтона-Якобі і хвильове рівняння. Гамільтоновий формалізм для дисипативних систем.

8. Малі коливання. Вільні одновимірні коливання. Вимушені коливання. Коливання при наявності сил тертя. Затухаючі коливання. Вимушені коливання при наявності тертя. Коливання систем з багатьма ступенями вільності. Коливання одновимірного ланцюжка атомів. Ангармонічні коливання. Параметричний резонанс. Рух в швидко осцилюючому полі.

9. Рух твердого тіла. Кутова швидкість. Тензор інерції. Момент імпульсу твердого тіла. Рівняння руху твердого тіла. Кути Ейлера. Рівняння Ейлера для руху твердого тіла. Рух в неінерційній системі відліку.

10. Неперервні системи. Приклади Лагранжіанів неперервних систем. Рівняння Лагранжа для поля. Рівняння Гамільтона для поля. Дужки Пуасона для поля. Рівняння руху ідеальної рідини. Поширення звуку в газах. Нестислива рідина. Стаціонарний рух. Рівняння Бернуллі.

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

1. Рівняння електродинаміки для зарядів і струмів у вакуумі. 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, ґрадієнтна 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 енерґії. 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.

2. 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, енерґія 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.

3. 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. Інтеґрал дії, функції Лаґранжа та Гамільтона, енерґія й імпульс; 4-вектор енерґії-імпульсу. Рівняння руху вільної частинки у формі Лаґранжа–Ейлера, Гамільтона та Гамільтона–Якобі.

Заряджена частинка в електромагнітному полі. Функції Лаґранжа 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 енерґії-імпульсу.

КВАНТОВА МЕХАНІКА

1. Основні принципи квантової механіки

Опис стану в квантовій механіці. Хвильова функція. Принцип суперпозиції (приклади з теорії ядерних сил, квантової хімії, фізики твердого тіла, Кіт Шредінґера). Хвильовий пакет. Хвильова функція вільної частинки. Властивості плоских хвиль. Середні значення координати та імпульсу. Оператор імпульсу. Співвідношення невизначеностей Гайзенберґа. 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 доповнюваності Бора.

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

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

Квантові дужки Пуасона. Стаціонарні стани. Представлення Шредінґера і представлення Гайзенберґа. Представлення взаємодії.

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. Резонансні стани. Холодна емісія електронів з металу. Теорія Ґамова розпаду важких ядер.

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 проекцій моменту кількості руху. Власні функції операторів квадрата та проекцій орбітального моменту кількості руху.

7. Рух частинки в центральносиметричному полі. Рух в полі центральної сили. Радіальне рівняння Шредінґера. Рух в кулонівському полі. Атом водню. Атом водню. Інтеграл руху Лапласа-Рунґе-Ленца (метод В. Паулі).

ТЕРМОДИНАМІКА І СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА

1. Начала та основні співвідношення термодинаміки

Перше і друге начала термодинаміки. Характеристичні функції. Співвідношення Максвела 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.

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:цюг 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 K. 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 Айнштайна та Дебая теплоємності твердих тіл. Від'ємні температури для систем з обмеженим енергетичним спектром.

ДИСЦИПЛІНИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ

ФІЗИКА НАНОРОЗМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

1. Енергетичний спектр низькорозмірних систем.

Квантування енергії електронів у низько¬розмір¬них системах Енергетичні стани у прямокутному, параболі¬ному, трикутному потенціалах. Особливості зміни густини електронних станів при переході від 3D до 0D системи.

2. Властивості двомірного електронного газу.

Енергетичні рівні та хвильові функції. Наближення Хартрі для електронів у шарах просторового заряду. Квазікласичне наближення для напів¬провід¬ників з параболічним і непараболічним законом дисперсії.

3. Електронні властивості двомірних невпорядкованих систем.

Елементи теорії невпорядкованих систем. Перехід Андерсена у 3D і 2D системах. Концепція мінімальної металічної провідності. Логарифмічна провідність при низьких температурах.

4. Одномірні системи, квантові дроти, надґратки.

Квантування одномірної провідності. Дробова провідність і поняття про рідину Латтінджера. Напівпровідникові надґратки. Композиційні та леговані надґратки. Енергетичний спектр. Перехід напіметал-напівпровідник. Фізичні властивості надґраток. Густина станів. Оптичні властивості: внутріш¬ньозонні та міжзонні переходи. Електропровідність надґраток.

5. Оптичні властивості нанорозмірних структур.

Екситони у двовимірних напівпровідниках. Екситони у квантових нитках та квантових точках. Люмінесцентні властивості квантових точок. Зміна ширини забороненої зони. Оцінка розмірів наночасток за спектральними даними. Перетворення і генерація оптичного випромінювання в наноструктурах. Фотонні кристали, у тому числі з оптично активними наноструктурами (напівпровідниковими та металічними). Поляритонні ефекти в мікрорезонаторах з активними квантовими ямами.

6. Вуглецеві наноструктури.

Фулерени, одностінкові та багатостінкові вуглецеві нанотрубки. Методи їх синтезу та діагностики. Електронні та оптичні властивості.

7. Методи синтезу наноструктур.

Фізичні методи синтезу наноструктур засновані на випаровуванні. Катодне розпилення. Магнетронне розпилення. Іонне розпилення багатокомпонентних матеріалів. Епітаксія тонких плівок з газової фази. Епітаксія і характер межі розділу "плівка-підкладка". Режими гетероепітаксійного росту. Молекулярно-променева епітаксія. Газофазна епітаксія з металорганічних сполук (МОС гідридна епітаксія). Хімічні методи синтезу наноматеріалів. Колоїди та колоїдні частинки в розчинах. Технологія Ленгмюра – Блоджет. Золь-гель метод синтезу наноматеріалів. Гідро- та сольвотермічний синтез. Синтез наноструктур з використанням біоорганізмів.

8. Методи спостереження і дослідження наноструктур.

Просвічувальний електронний мікроскоп. Сканувальний електронний мікроскоп. Зондова мікроскопія.

ПРИКЛАДНА СПЕКТРОСКОПІЯ

Поняття про види спектрального аналізу. Характерні особливості та можливості спектрального аналізу. Області використання спектрального аналізу. Застосування спектрального аналізу в астрофізиці. Теоретичні основи спектрального аналізу. Лінійчасті атомні спектри. Хвильові властивості електронів, квантові числа. Періодична система елементів і атомні спектри. Типи спектрів.

Принципова схема спектральних приладів. Основні характеристики спектральних приладів. Класифікація спектральних приладів. Основні типи спектрометрів. Основні

вимоги до фотоелектричних спектральних приладів. Методика дослідження спектрів поглинання конденсованих речовин у видимій та УФ областях.

Особливості оптичної електронної спектроскопії речовин в конденсованому стані. Форма електронних орбіталей для різних електронних станів. Внутрішньоіонні переходи. Спектри перенесення заряду. Моделі, що описують форму і поведінку краю поглинання. Енергетичні рівні іонів перехідних металів. Діаграми Сугано-Танабе. Енергетичні рівні в лазерних кристалаах. Прості хромофорні групи. Стереохімія. Форма та інтенсивність спектральних смуг. Термохромний ефект. Термохромні матеріали. Фізичні основи люмінесценції. Центри свічення.

Види люмінесценції. Флуоресценція. Фосфоресценція. Інформація, яку можна отримати зі спектрів люмінесценції. Параметри люмінесценції. Спектри збудження. Екситонна люмінесценція. Екситони в наноструктурах. Застосування люмінесценції і споріднених явищ в оптоелектроніці.

Походження молекулярних спектрів. Спектроскопія КРС і резонансна КР спектроскопія. Коливання багатоатомної молекули. Типи коливань. ІЧ спектроскопія. Особливості експериментального дослідження ІЧ спектрів твердих тіл і розчинів. Методика вимірювання спектрів КРС. Геометрія експерименту. Метод групових частот. Характеристичні коливні частоти функціональних груп. Особливості коливної спектроскопії монокристалів. Фактор-груповий аналіз.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

1. Дифракційний структурний аналіз як метод визначення атомної структури речовини. Порівняння рентгено-, електроно-, нейтронографічних методів.

2. Фізика рентгенівських променів, характеристичний і суцільний спектри, поглинання і розсіяння рентгенівських променів близько і далі від краю поглинання. Генератори рентгенівського випромінювання (рентгенівський апарат, рентгенівська трубка, синхротрон). Типова апаратура для РСА досліджень. Основні характеристики рентгенівських камер і дифрактометрів. Основні методи РСА.

3. Електронографія матеріалів. Проблеми розвитку газової електронографії. Будова і принцип роботи сучасних електронних мікроскопів.

4. Структурна нейтронографія. Особливості застосування нейтронографії.

5. Дослідження структури невпорядкованих систем дифракційними методами. Структурний фактор, функції радіального розподілу.

6. Структура речовини і малокутова дифракція. Основні принципи малокутової дифракції. Принципи побудови малокутових установок.

7. Сучасні методи високоенергетичної спектроскопії для встановлення реальної атомної будови неорганічних матеріалів. Фізичні основи EXAFS - спектроскопії – нового методу структурного аналізу. Методи вивчення атомної структури речовини згідно EXAFS – спектрів.

8. Будова та принцип роботи растрового електронного мікроскопа. Дослідження топології поверхні у пружньо-відбитих та вторинних електронах. Детектор Еверхарта-Торнлі. .Енергодисперсійний аналіз у растровій електронній мікроскопії. Спектрометр з дисперсією по довжині хвилі

9. Основи скануючої зондової мікроскопії. Принцип роботи скануючих зондових мікроскопів. Методи скануючої зондової мікроскопії. Основні види СЗМ: скануюча тунельна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, електросилова мікроскопія, магнітосилова мікроскопія. Літографія за допомогою атомно-силового мікроскопу. Дослідження розподілу електричного опору за допомогою АСМ. Точкові вольт-амперні характеристики.

10. Особливості молекулярної люмінесценції. Види гасіння молекулярної люмінесценції.

11. Загасання люмінесценції. Термолюмінесценція та методи визначення параметрів центрів захоплення.

12. Екситони. Люмінесценція вільних екситонів. Автолокалізація електронних збуджень. Релаксовані та нерелаксовані дірки. Автолокалізовані екситони. Люмінесценція низькорозмірних систем.

13. Перенесення, міграція та трансформація електронних збуджень в кристалах. Основні типи дефектів. Механізми утворення центрів забарвлення. Центри забарвлення. Діркові центри забарвлення.

16. Синхротронне випромінювання – властивості та застосування.

17. Імпульсна абсорбційна спектроскопія з часовим розділенням.

18. Лазерна імпульсна спектроскопія.

19. Методи визначення показників заломлення і двопроменезаломлення.

20. П’єзоелектричні властивості кристалів та методи їх дослідження.

21. Методи визначення абсолютних і відносних п’єзооптичних констант.

21. Вивчення доменної структури фероїків оптико-поляризаційним методом. Вивчення доменної структури фероїків методом атомно-силової мікроскопії.

22. Дилатометричні дослідження фазових переходів у кристалах.

МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛІВ ТА НАНОМАТЕРІАЛІВ

1. Методи та принципи моделювання атомних систем різних масштабів.

2. Особливості моделювання низькорозмірних і наносистем.

3. Метод Монте-Карло.

4. Метод скінченних елементів.

5. Схема інтегрування рівнянь руху Ньютона для N-атомної системи в методі молекулярної динаміки.

6. Чисельні алгоритми в методі молекулярної динаміки.

7. Алгоритм Верле.

8. Алгоритм Верле у швидкісний формі.

9. Алгоритм предиктор-коректор.

10. Алгоритм-схема пробігу молекулярної динаміки.

11. Попередні налаштування процесу молекулярної динаміки.

12. Ініціалізація. Вхідні параметри молекулярної динаміки.

13. Методи найкрутішого спуску та спряжених градієнтів.

14. Процес врівноваження в процедурі молекулярної динаміки.

15. Термодинамічні ансамблі у молекулярній динаміці.

16. Генерування даних молекулярної динаміки.

17. Функція радіального розподілу. Загальний вигляд для речовини вкристалічному, аморфному і рідкому станах.

18. Енергетичні характеристики атомних систем.

19. Квантово-механічний розгляд атомних систем.

20. Спрощення при розгляді n-електронної системи для розв’язання рівняння Шредінгера.

21. Властивості електронних хвильових функцій.

22. Наближення Борна-Оппенгеймера.

23. Оператор Гамільтона для n-електронної системи.

24. Розрахунок енергії n-електронної системи за методом Гартрі.

25. Наближення Гартрі-Фока. Застосування методу Гартрі-Фока.

26. Електронна густина. Теореми Хоенберга–Кона.

27. Самоузгоджена процедура знаходження електронної густини.

28. Оптимізація багатоелектронної системи.

29. Розрахунок зонно-енергетичної структури методом ab initio.

30. Розрахунок коливних та оптичних спектрів методом ab initio.

31. Моделювання збуджених електронних станів.

32. Моделювання сигналів у графічному програмному середовищі. Основні підходи до генерації сигналів.

33. Цифрова обробка сигналів. Квантування та дискретизація при аналогово-цифровому перетворенні сигналу. Критерій Найквіста.

34. Нейронні мережі та експертні системи.

ФІЗИКА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Використання низьких температур в науці та техніці. Основи вакуумної фізики. Критерій Кнудсена. Основне рівняння вакуумної техніки.

Методи отримання вакууму. Типи вакуумних насосів. Загальна характеристика. Вакуумні насоси об'ємної дії. Принцип дії турбомолекулярних насосів. Приклади турбомолекулярних насосів та їх характеристики. Характеристики пароструменевих насосів. Дифузійні та ежекційні насоси. Фізико-хімічні методи отримання вакууму.

Методи вимірювання вакууму. Вакуумні перетворювачі. Зберігання та транспортування кріорідин. Трансфер рідкого гелію.

Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз гелію 4He. Фазова діаграма. Фізичні властивості газоподібної та рідкої фаз гелію 3He. Фазова діаграма. Гелієві кріостати з температурою вищою 4,2 К. Переваги та недоліки. Відкачувальні гелієві кріостати з діапазоном температур 1,3 К - 4,2 К.

Теоретичні реверсивні цикли. Цикл Карно. Коефіцієнт корисної дії циклу Карно. Модифіковані цикли Карно. Цикл Стірлінга. Кріокулер на основі пульсаційних трубок. Ефект Джоуля-Томсона. Холодильна машина на основі ефекту Джоуля-Томсона.

Принципова схема кріостату. Переваги та недоліки методу. Охолодження на основі адіабатичної демагнетизації парамагнітних солей. Схема кріостату. Переваги та недоліки методу. Мікрокельвіновий діапазон температур. Рефрижератори на основі ядерної адіабатичної демагнетизації.

Термодинамічна шкала температур. Первинні термометри. Вторинні термометри. Вимоги до вторинних термометрів. Опорові та ємнісні термометри. Термоелектричні сенсори – термопари. Особливості вимірювань у низьких температурах.

Явище надпровідності. Надпровідники першого до другого роду. Ефект Мейснера. Рівняння Лондонів. Основні положення теорії надпровідності Бардіна-Купера-Шрифера. Ефект Джозефсона. Принцип дії квантового інтерферометра. Теплоємність при низьких температурах. Закон Дюлонга-Пті. Модель теплоємності Ейнштейна. Теорія Дебая. Теплопровідність при низьких температурах. Закон Відемана-Франца.

КРИТЕРІЇ
оцінювання знань на фаховому вступному іспиті до аспірантури для здобуття ступеня доктора філософії

Вступний іспит зі спеціальності дає змогу оцінити наявність знань, умінь, навиків абітурієнтів відповідно до вимог програми вступного іспиту до аспірантури за спеціальністю Е6 Прикладна фізика та наноматеріали.

Екзаменаційні білети вступного іспиту зі спеціальності Е6 Прикладна фізика та наноматеріали формуються в обсязі програми рівня вищої освіти магістра зі спеціальності.

Екзаменаційний білет вступного іспиту до аспірантури містить письмову компоненту з чотирьох питань, два питання з розділу «Загальна фізика» та по одному питанню з розділів «Теоретична фізика» і «Дисципліни спеціальної підготовки».

Кожне теоретичне питання максимально оцінюється 40 балами.

Критерії оцінювання відповіді на запитання білета:

31–40 балів – здобувач ґрунтовно висвітлює питання з білету, виявляє поглиблене розуміння фізичних законів та фізичного змісту понять, що входять у ці закони, вільно послуговується науковою термінологією, ґрунтовно відповідає на уточнюючі запитання;

21–30 балів – здобувач у більшій мірі висвітлює питання з білету, розуміє суть фізичних законів та фізичних понять, що в них входять, допускає окремі неістотні неточності та незначні помилки;

11–20 балів – здобувач не повністю розкрив зміст питань з білету, виявляє поверхневе розуміння фізичної суті законів та фізичних понять; при висвітленні питань з білету не вистачає достатньої глибини та аргументації, допускаються при цьому окремі неточності та незначні помилки.

0–10 балів – здобувач не відповідав на питання з білету, або у відповіді допускає суттєві помилки.

Складовою Фахового іспиту зі спеціальності є науковий реферат (від 6 до 10 стор.) з тематики майбутнього наукового дослідження.

Науковий реферат має містити:

а) постановка проблеми;
б) актуальність майбутнього дослідження;
в) аналіз останніх досліджень і публікацій;
г) викладення основного матеріалу;
д) висновки;
е) література.

Науковий реферат оцінює предметна комісія в день іспиту.

Тематика майбутніх наукових досліджень:

1. Рефрактометрія діелектричних кристалів в умовах зовнішніх впливів.
2. Оптико-електронні параметри діелектричних кристалів.
3. Акустооптичні взаємодії в кристалах.
4. Люмінесцентно-кінетичні параметри кристалів перовскітів та розрахунок їхньої електронної енергетичної структури.
5. Оптико-електронні параметри діелектричних фероїків під впливом зовнішніх полів.
6. Електронні та оптичні властивості кристалів для середнього ІЧ діапазону.
7. Вплив домішок на електронну енергетичну структуру галоїдних перовскітів.
8. Квантово-розмірні ефекти у тонкоплівкових системах.
9. Електрофізичні властивості фероїків в області фазових переходів.
10. Вимірювання відгуку Лошмідта і його зв'язок із спостережуваними величинами квантових систем.