

**Фізико-технічний інститут низьких температур  
ім. Б.І.Веркіна  
Національної академії наук України**

Затверджено Вченою радою  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна  
НАН України  
26.03.2025 р., протокол № 4

Голова Вченої ради  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна  
НАН України  
чл.-кор. НАН України

Ю.І. Найдюк  
«27» березня 2025р



**ПИТАННЯ**

**до вступного іспиту до аспірантури для навчання за освітньо-науковою  
програмою «Фізика» зі спеціальності Е5 «Фізика та астрономія»  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України**

**I. Механіка**

Кінематика. Швидкість, прискорення. Кутова швидкість, кутове прискорення.

Динаміка. Закони Ньютона. Маса і сила. Енергія і робота. Закони збереження.  
Рівняння руху. Системи відліку.

Сили при криволінійному русі. Обертання тіла. Момент сили. Момент інерції.

Коливання систем з одним і багатьма ступенями свободи. Вільні і вимушені  
коливання. Затухаючі коливання. Показник згасання.

Гідродинаміка. Тиск в рідинах і газах. Закон Бернуллі. Рівняння ідеальної  
рідини. В'язкість. Ламінарна і турбулентна течії. Число Рейнольдса. Течія  
в'язкої рідини. Рівняння Нав'є - Стокса. Формула Пуазеля.

Хвилі в суцільному середовищі. Рівняння хвилі. Акустичні хвилі. Ультразвук.  
Ефект Доплера.

**II. Основи квантової механіки.**

Експериментальні факти, що лежать в основі квантової теорії. Закони теплового  
випромінювання конденсованих середовищ, формула Планка. Атомні спектри  
випромінювання. Атом водню.

Постулати Бора. Досліди по дифракції електронів і атомів. Хвильові і корпускулярні властивості матерії. Гіпотеза де Бройля.

Основні постулати квантової механіки. Принцип суперпозиції. Принцип невизначеності. Фізичні величини як оператори.

Хвильова функція і її властивості. Густина імовірності і матриця імовірності. Принцип невизначеності.

Оператор Гамільтона. Оператор імпульсу. Чисті і змішані стани квантово-механічної системи. Рівняння Шредінгера.

Конкретні квантові системи. Рух в прямокутній і гармонійній потенційних ямах. Рух в кулонівському полі.

Енергії і хвильові функції стаціонарних станів. Проходження частинок через потенційний бар'єр. Тунельний ефект. Спін. Тотожність частинок.

### **Ш. Термодинаміка і статистична фізика.**

Атомно-молекулярна теорія будови речовини. Основні уявлення кінетичної теорії газів. Ідеальний газ. Основні газові закони. Розподіл Максвелла. Розподіл Больцмана.

Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Теплоємність газів. Явища переносу в газах (дифузія, теплопровідність).

Робота і теплота. Стан термодинамічної системи. Внутрішня енергія, теплота і робота. Перше начало (закон) термодинаміки. Рівняння адіабати ідеального газу. Робота при адіабатичній та ізотермічній зміні об'єму газів.

Друге начало (закон) термодинаміки. Оборотні та необоротні процеси. Ентропія. Поняття статистичної ваги. Статистичне формулювання другого закону термодинаміки.

Канонічний розподіл Гіббса. Статистична сума і вільна енергія системи. Статистика Больцмана. Вплив спіну на статистику системи. Розподіли Бозе-Ейнштейна і Фермі-Дірака.

Рівноважне випромінювання абсолютно чорного тіла. Спектральна густина випромінювання. Формула Планка.

Термодинамічні потенціали, термодинамічні функції. Теплоємність. Закон Дюлонга і Пті, теорії Ейнштейна і Дебая. Коефіцієнти розширення.

Рівновага фаз. Фазові переходи I і II роду. Флуктуації. Тверді розчини і проміжні фази.

Рівновага у багатокомпонентних системах і правило фаз. Діаграми рівноваги. Кінетика фазових перетворень. Дифузійні і бездифузійні перетворення.

#### **IV. Структура твердих тіл.**

Кристалічні та аморфні тіла. Ближній і далекий порядок. Трансляційна симетрія. Елементарна комірка. Решітки Браве. Точкові та просторові групи.

Дифракція в кристалах. Закон Брега. Обернена ґратка. Зони Бриллюена.

Електронна структура атомів, валентність. Хімічний зв'язок в твердих тілах. Основні типи хімічного зв'язку. Структурні і фізичні особливості іонних, ковалентних, молекулярних і металічних кристалів. Щільні упаковки.

Дефекти в кристалах. Точкові дефекти, їх утворення, міжвузловині атоми та вакансії. Комбінації атомних дефектів, пари Френкеля. Дифузія точкових дефектів. Краєві та гвинтові дислокації. Вектор Бюргерса. Переповзання і ковзання. Вплив радіаційних, механічних, термічних дій на реальну структуру твердих тіл.

#### **V. Енергетичний спектр кристалів.**

Опис енергетичного стану кристалів за допомогою газу квазічастинок. Приклади квазічастинок: фонони, магнони, ексітони, плазмони. Електрони в металі як квазічастинки. Квазіімпульс.

Закон дисперсії. Теорема Блоха. Густина станів. Статистика газу квазічастинок: бозони та ферміони. Взаємодія квазічастинок.

Коливання решітки - фонони. Акустична і оптична гілки коливань. Спектральна густина, наближення Ейнштейна і Дебая, дебаєвська частота.

Теплоємність кристалу. Анггармонізм і теплове розширення.

Електронні стани в кристалах. Одноелектронна модель. Наближення сильного та слабого зв'язку. Ефективна маса електрона.

Зонна схема та типи твердих тіл. Вироджений електронний газ. Поверхня Фермі. Електронна теплоємність. Електрони та дірки.

#### **VI. Електронні кінетичні властивості твердих тіл.**

Електро- та теплопровідність. Часи релаксації. Механізми розсіювання

електронів. Розсіювання на домішках і дефектах. Електрон-фононні зіткнення. Нормальні процеси та процеси перекиду. Магнітоопір і ефект Холу.

Метали з великою довжиною вільного пробігу електронів. Аномальний скін-ефект. Циклотронний резонанс та розмірні ефекти. Квантування орбіт в магнітному полі. Ефект де Гааза - ван Альфена.

Напівпровідники. Електронна структура типових напівпровідників. Домішкові рівні. Донори і акцептори. p-n переходи. Фотопровідність. Рекомбінація і релаксація нерівноважних носіїв. Гарячі носії. Ефект Гана.

## **VII. Механічні, оптичні та магнітні властивості твердих тіл.**

Тензор деформацій, тензор напружень. Тензор пружних сталих та пружна деформація. Пластичність кристалів. Границя плинності. Зміцнення. Внутрішнє тертя.

Фотони в твердих тілах. Віддзеркалення і заломлення. Показник заломлення. Механізми поглинання фотонів. Поглинання вільними носіями. Решіткове поглинання. Багатофононні процеси.

Комбінаційне розсіяння світла в кристалах. Поглинання пов'язаними носіями. Правила відбору. Міжзонні прямі і косі переходи. Люмінесценція. Часи життя збуджень, флюоресценція.

Намагніченість і сприйнятливість. Діамагнетизм вільного електронного газу. Спіновий парамагнетизм. Феромагнетизм.

Закони Кюрі і Кюрі - Вейса. Фазовий перехід в феромагнітному стані. Феромагнітні домени. Магнітний гістерезис. Енергія анізотропії.

Доменна стінка. Молекулярне поле Вейса. Обмінна взаємодія. Антиферомагнетики. Магнітна структура. Точка Неєля. Сприйнятливість антиферомагнетиків. Ферити. Магнітострикція.

## **VIII. Діелектрики.**

Поляризація діелектриків. Макроскопічне електричне поле. Локальне поле на атомі. Діелектрична проникність і поляризованість. Електронна, іонна і дипольна поляризованість.

Діелектрична релаксація. Формула Дебая. Електрострикція і п'єзоелектрика. Піроелектрики і сегнетоелектрики. Електричний гістерезис. Сегнетоелектричні домени.

## **ІХ. Методи отримання низьких температур.**

Ідеальний процес зрідження газів і мінімальна робота зрідження. Зрідження водню і гелію. Охолодження шляхом відкачування пари  $^3\text{He}$  і  $^4\text{He}$  та методом розчинення  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ .

Охолодження з використанням ефекту Померанчука і адіабатичного розмагнічування. Термометрія при низьких температурах.

## **Х. Криокристали**

Взаємодія газів з криогенними поверхнями. Коливання молекул і коливальна спектроскопія. Фазові діаграми і структурні фазові перетворення криокристалів. Аморфні і кристалічні плівки кріоконденсатів газів.

Молекулярні криокристали. Основні типи кристалічних решіток молекулярних криокристалів. Квантові криокристали. Спінові стани.

## **ХІ. Гелій-4 і гелій-3**

Фазова діаграма  $^4\text{He}$  і  $^3\text{He}$ . Енергетичний спектр надплинного  $^4\text{He}$  і критична швидкість Ландау. Температурна залежність фононного і ротонного вкладів в теплоємність. Термомеханічний ефект. 1-й і 2-й звуки.

Вихори в надплинному  $^4\text{He}$ . Фермі-рідина: температура звиродніння, теплоємність, в'язкість теплопровідність.

## **ХІІ. Надпровідність.**

Основні властивості надпровідників. Електроопір при низьких температурах. Критична температура. Ефект Мейснер-Оксенфельда. Критичне магнітне поле. Критичний струм. Теплоємність надпровідників. Теплопровідність надпровідників. Ізотопічний ефект.

Електрон-фононна взаємодія. Енергетична щілина і квазічастинки в надпровідниках. Надпровідники 1-го і II-го роду. Вихори і вихрові структури. Куперівські пари. Тунельний ефект.

Стаціонарний і нестаціонарний ефекти Джозефсона. Високотемпературні надпровідники (ВТНП). Кристалографічна структура, електропровідність і магнітні властивості купратних (оксидних) ВТНП.

## **ХІІІ. Нанофізика.**

Класифікація наночастинок і нанооб'єктів. Основні принципи формування

наносистем. Фізичні та хімічні методи отримання нанооб'єктів.

Фізика тонких плівок та наноматеріали. Методи отримання тонких плівок: термічне напилювання, катодне напилювання, електрополіровка і шліфування.

Алотропні форми вуглецю: фулерени, нанотрубки, графен, структура і фізичні властивості.

Методи дослідження і діагностика нанооб'єктів та наносистем. Електронна растрова і просвічуюча мікроскопія. Дифракційні методи дослідження. Оптичні методи діагностики. Скануюча зондова мікроскопія: Силова мікроскопія.

#### **XIV. Експериментальні методи фізики конденсованого стану.**

Вимірювання фізичних величин. Системи одиниць. Система СІ. Точність вимірювань. Типи похибок. Ймовірнісні методи оцінки помилок. Середньоквадратична помилка. Довірчий інтервал.

Рентгенографія: методи дослідження ідеальної і реальної структури. Електронографія і електронна мікроскопія. Нейтронографія: пружне і непружне дослідження магнітних структур і фононних спектрів. Ефект Месбауера.

Електронний парамагнітний резонанс. Ядерний магнітний резонанс. Електричні і гальваномагнітні методи вивчення електронної структури кристалів. Оптичні методи дослідження.

#### **XV. Теоретична механіка**

Ньютонівська механіка: Основні принципи механіки: простір та час принцип відносності, принцип детермінізму. Закони Кеплера. Рівняння Ньютона.

Лагранжева механіка: Динамічні системи із зв'язками. Узагальнені координати. Криволінійні координати. Варіаційний принцип. Дія та принцип найменшої дії.

Рівняння Лагранжа. Функція Лагранжа вільної матеріальної точки та системи матеріальних точок. Рівняння Лагранжа систем із розподіленими параметрами.

Канонічні рівняння: Дія як функція координат та часу. Принцип Мопертюї та скорочена дія. Рівняння Гамільтона-Якобі. Канонічні рівняння Гамільтона. Зв'язок рівнянь Лагранжа та Гамільтона. Виведення канонічних рівнянь із варіаційного принципу.

Закони збереження: Властивості симетрії механічних систем та

інтеграли руху. Енергія механічної системи. Імпульс системи матеріальних точок та узагальнені імпульси. Центр інерції. Ізотропія простору і збереження кутового моменту. Механічна подібність. Вірйальна теорема.

Інтегрування рівнянь руху: Динаміка систем з одним ступенем свободи. Якісний аналіз руху на фазовій площині. Визначення виду потенційної енергії за залежністю частоти коливання від його енергії.

Задача двох тіл. Рух у центральному полі. Замкнуті та незамкнуті траєкторії.

Задача Кеплера та рух в кулонівському потенціалі: Фінітний рух частинки в ньютонівському полі тяжіння. Форма траєкторії руху. Рух частинки по орбіті. Закони Кеплера.

Інфінітний рух в ньютонівському потенціалі. Рух заряду в кулонівському полі відштовхування. Інтеграл Рунге-Ленца.

Теорія розсіювань: Розсіювання частинок в системі центра інерції. Ефективний переріз розсіювання. Розсіювання частинок в кулонівському полі. Формула Резерфорда. Малокутове розсіювання. Пружне зіткнення частинок в системі центру інерції та в лабораторній системі. Формула Резерфорда в лабораторній системі відліку.

Лінійні коливання: Гармонійний осцилятор. Затухаючі коливання. Дисипативна функція. Змушені коливання. Явище лінійного резонансу. Резонанс за наявності тертя. Параметричний резонанс під дією довільного періодичного впливу.

Параметричний резонанс при гармонічному збудженні. Вплив тертя на параметричний резонанс. Система двох зв'язаних лінійних осциляторів.

Колівання атомних ланцюжків: Лінійні коливання систем з кількома ступенями вільності, нормальні моди. Лінійні коливання ланцюжків атомів. Частота коливань, хвильове число та закони дисперсії лінійних хвиль.

Слабонелінійні коливання: Математичний маятник, осцилятор Дюффінга та їх фазові портрети. Малі коливання в резонансному наближенні. Нелінійний зсув частоти. Теорія збурень для малих коливань.

Резонанс в нелінійних системах. Вплив загасання на нелінійний резонанс. Явище гістерезису. Нелінійний параметричний резонанс. Рух у швидко осцилюючому полі. Маятник Капіци.

Рух твердого тіла: «Тверде тіло» та його ступені вільності. Кутова швидкість. Тензор інерції твердого тіла. Кінетична енергія тіла, що обертається. Момент імпульсу твердого тіла. Вільне обертання симетричної дзиги. Рівняння руху твердого тіла. Ейлерові кути. Зв'язок кутової швидкості з кутовими координатами.

Рівняння Ейлера. Якісний аналіз динаміки асиметричної дзиги та її малоамплітудні обертання. Рух в неінерційній системі відліку. Відцентрова сила та сила Коріоліса.

Канонічні перетворення: Перетворення узагальнених координат та імпульсів. Канонічні перетворення гамільтонових систем. Твірні функції канонічних перетворень. Динаміка гамільтонових систем, як канонічне перетворення. Дужки Пуассона та їх властивості.

Інтеграли руху та теорема Пуассона. Фундаментальні дужки Пуассону та умова канонічності перетворень. Теорема Ліувілля. Рішення задач механіки за відомими повним інтегралом.

Рівняння Гамільтона-Якобі. Знаходження повного інтегралу. Рівняння Гамільтона-Якобі методом розділення змінних. Адіабатичні інваріанти та квазікласичне квантування. Канонічні змінні «дія-кут».

Голова приймальної комісії  
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна  
НАН України,  
Гарант освітньо-наукової програми «Фізика»  
третього (освітньо-наукового) рівня  
вищої освіти за спеціальністю  
«Фізика та астрономія»  
доктор фіз.-мат. наук, проф.



Олександр ДОЛБИН