

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

НАУМОВЕЦЬ АРТЕМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 536.2.01, 534-141

**ОПИС ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛІВ ТА
НАДПЛИННОГО ГЕЛЮ З УРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ПОЛІВ ТА
ВЗАЄМОДІЇ КВАЗІЧАСТИНОК**

01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики ядра та високих енергій імені О.І Ахієзера навчально-наукового інституту «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
Ходусов Валерій Дмитрович,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України, кафедра фізики ядра та високих енергій імені О.І Ахієзера.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України
Ямпольський Валерій Олександрович,
Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, головний науковий співробітник відділу теоретичної фізики;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Шевченко Сергій Миколайович,
Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України, завідувач відділу надпровідних і мезоскопічних структур.

Захист відбудеться « 27 » квітня 2021 р. о 17 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02 у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, та на офіційному сайті ННЦ ХФТІ.

Автореферат розісланий « ____ » _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02
канд. фіз.-мат. наук

А.І. Кірді́н

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Значну кількість сучасних експериментальних і теоретичних робіт з фізики конденсованих середовищ присвячено дослідженню явищ, що ґрунтуються на нелінійних ефектах. До них належать об'ємне теплове розширення, взаємодія акустичних хвиль, поляризація діелектриків, загасання звуку внаслідок взаємодії когерентних фононів з тепловим шумом, відхилення від закону Дюлонга-Пті. Нелінійність в кристалах пов'язана з нелінійністю сил міжмолекулярної взаємодії в твердому тілі. Теоретичний опис передбачає розвинення вільної енергії в ряд за інваріантами тензора деформації до доданків третього і четвертого ступеня, що призводить до громіздких рівнянь руху, оскільки коефіцієнт при доданку четвертого ступеня є тензором восьмого рангу в тривимірному просторі, що містить 126 незалежних елементів для довільної симетрії кристала зі 6561 елемента. Точне розв'язання таких рівнянь є неможливим. Зведення опису пружних властивостей кристала будь якої симетрії до ізотропного середовища істотно спрощує задачу. Так, наприклад, розвинення вільної енергії вже до третіх ступенів за тензором деформації, дало змогу пояснити явище об'ємного теплового розширення та побудувати п'ятиконстантну теорію пружності.

В області високих температур, де модель Дебая збудження середовища, що являє собою газ невзаємодіючих при будь-якій температурі квазічастинок – фононів, виявляється неповною, оскільки кількість фононів зростає зі збільшенням температури, і взаємодія між ними стає істотною. Температурні залежності термодинамічних коефіцієнтів, які знаходять в експериментах при високих температурах, не збігаються з передбаченнями лінійної теорії, а наявні нелінійні моделі є не до кінця обґрунтованими. Для побудови моделі сильно взаємодіючих фононів потрібно розвинути гамільтоніан в ряд за градієнтами вектора зсуву до доданків четвертого ступеня, що при спрощеному описі в наближенні ізотропного середовища вимагає розрахунку модулів пружності четвертого порядку середовища, еквівалентного до реального кристалу.

У експериментах з розповсюдження теплових хвиль надплинним гелієм спостерігалася електрична активність. Це незвичайне явище полягало в тому, що в стоячій хвилі другого звуку в He-II виникала електрична різниця потенціалів на границі резонатора, що змінювалась у фазі зі звуком. При цьому в нормальному стані гелію, а також у хвилі першого звуку, виникнення електричної різниці потенціалів не спостерігалось.

Результати експериментів ініціювали появу цілої низки теоретичних робіт, у яких досліджувалися електромагнітні властивості надплинного гелію. Однак ці теоретичні роботи не давали послідовного і несуперечливого пояснення явищ, які спостерігаються в експерименті. У зв'язку з цим вважається, що дотепер відсутня послідовно обґрунтована теорія електричної активності гелію.

Наявність перерахованих вище невирішених проблем робить актуальним і важливим проведення теоретичних досліджень теплових та електричних

властивостей конденсованих середовищ у моделі квазічастинок. Результати таких досліджень становлять основний зміст даної дисертаційної роботи.

Мета й завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є теоретичний опис електричних проявів надплинного гелію та впливу нелінійності кристалічної ґратки твердого тіла на його термодинамічні властивості в моделі взаємодіючих квазічастинок.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні задачі:

- розширити теоретичний опис нелінійних пружних властивостей твердих тіл в моделі ізотропного середовища;
- розробити техніку розрахунку модулів пружності четвертого рангу ізотропного середовища еквівалентного до реальних кристалів з симетрією довільної кристалічної системи;
- дослідити вплив домішок і границь кристалу на розповсюдження теплових хвиль в твердих тілах;
- побудувати двокомпонентну гідродинаміку квантової рідини з урахуванням зовнішнього електричного поля;
- визначити умови виникнення індукованого електричного поля в газі теплових збуджень надплинного гелію та порівняти їх з наявними експериментальними даними з електромеханічної поляризації гелію.

Об'єкт дослідження: кристали кінцевих розмірів з кубічною кристалічною ґраткою за високих та низьких температур, надплинний гелій у зовнішньому змінному електричному полі.

Предмет дослідження: термодинамічні властивості кристала з урахуванням нелінійних ефектів взаємодії фононів, електричні прояви теплових збуджень надплинного гелію.

Методи дослідження. Для розв'язку поставлених задач використані наступні методи теоретичної фізики: методи теорії збурень – для здобуття вигляду відхилень від локальнорівноважної функції розподілу; метод перетворень Фур'є – для розв'язання системи гідродинаміки лінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних; метод вторинного квантування – для квантового опису полів зсуву, періодичних у просторі та часі, та створення гамільтоніана взаємодіючих фононів твердого тіла; методи електродинаміки суцільних середовищ – для визначення електричних полів, які виникають у надплинному гелію; методи тензорного аналізу – для впорядкування симетрій тензорів вищих рангів у просторі вищих розмірностей.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі вперше отримані наступні результати:

1. Побудована нелінійна дев'ятиконстантна модель опису твердого тіла, яка враховує взаємодії трьох та чотирьох фононів.
2. Розроблено техніку розрахунку та розраховано модулі пружності четвертого рангу ізотропного середовища еквівалентного до реальних кристалів.
3. Розраховано відхилення теплоємності твердих тіл за високих температур в залежності від знаку параметра анізотропії для кристалів кубічної кристалічної системи.

4. Розраховано області існування хвиль другого звуку в кристалах алмазу та фториду літія. Визначено внески до часу життя фонона кристалічної ґратки від нормальних процесів, процесів перекидання, зіткнень з ізотопами та границею твердого тіла. Розглянуто випадок, коли переважають нормальні процеси.
5. Знайдено систему рівнянь дворідинної гідродинаміки надплинного гелію з урахуванням зовнішнього електричного поля. Доведено, що при русі надплинної складової He-II відносно системи квазічастинок надплинного гелію виникає електричне поле, обумовлене електричними властивостями квазічастинок гелію – ротонами.
6. Обчислено вектор поляризації, обумовлений дипольними моментами ротонів. Знайдений середній дипольний момент ротона узгоджуються з експериментальними даними.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи мають фундаментальний характер і формують низку нових фундаментальних знань про процеси взаємодії теплових фононів між собою, з домішками та із зовнішніми полями, а також, про електричні властивості надплинного гелію. Визначенні в роботі співвідношення концентрації ізотопів, розміру кристала та температури, за яких є можливим розповсюдження хвиль другого звуку, надають додаткові фізичні методи виміру ізотопічного складу речовини. Теоретичне пояснення відхилення ізохоричної теплоємності кристала за високих температур від закону Дюлонга-Пті робить можливим розробку високочутливих методів нелінійної діагностики, що ґрунтуються на вимірі цієї величини. Методика зведення опису кристала до ізотропного середовища, як і самі розраховані модулі пружності четвертого рангу, має суттєве теоретичне значення, оскільки вона спрощує спосіб знаходження оцінок нелінійних ефектів у твердих тілах. Використання моделі квазічастинок в дисертаційній роботі дало змогу пояснити особливості явищ, які спостерігалися в експерименті, що підтвердило справедливість цієї моделі для опису широкого класу властивостей квантових суцільних середовищ – від теплових до електричних. Це дає змогу вважати модель квазічастинок надійним інструментом для подальшого розвитку теорії квантових рідин. Гіпотеза існування дипольного моменту ротона, що знайшла підтвердження у дисертаційній роботі, дає змогу дати рекомендації щодо проведення нових експериментів з дослідження електричної активності надплинного гелію.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, узагальнені в дисертаційній роботі, знайдено в співавторстві за безпосередньої участі здобувача, та опубліковані у статтях [1-6] у фахових журналах і тезах доповідей наукових конференцій за фахом [7-16]. Автор брав активну участь на всіх етапах наукового дослідження: у постановці завдання, аналітичних та числових розрахунках, порівнянні результатів з експериментальними даними, обговоренні результатів і написанні статей. У роботі [1] автором було отримано дивергентний вид запису закону збереження імпульсу для двокомпонентної рідини у зовнішньому електричному полі. Дана оцінка константи зв'язку електричних і динамічних властивостей надплинного гелію з аналізу даних по

поляризації гелію при відносному русі надплинної та нормальної складових. У роботі [3] здобувачем запропоновано механізм зв'язку випромінення/поглинання електромагнітних хвиль з динамікою надплинного гелію. Теоретично обраховано границі появи вузької лінії у спектрі поглинання НВЧ хвиль у He-II за рахунок встановлення анізотропічної орієнтації диполів ротонів. У статтях [2, 4] здобувачем запропоновано модель зіткнень фононів із границею кристала та розраховано температурний проміжок існування теплових хвиль у твердих тілах в залежності від розмірів кристала та його ізотопічного складу. У роботі [5] дисертантом розроблена техніка розрахунку модулів пружності четвертого рангу ізотропного середовища еквівалентного до реальних кристалів кубічної кристалічної системи. Здобуто числові значення модулів пружності багатьох речовин. Це дало змогу здобувачу в роботі [6] виявити вплив нелінійності теплових збуджень кристалічної ґратки на термодинамічні властивості твердого тіла. Розрахована ізохорична теплоємність алмазу в проміжку від температури Дебая до плавлення кристалу. У роботі [10] розраховано коефіцієнт згасання низькочастотного змінного електричного поля у надплинному гелії.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на наукових семінарах ІТФ ННЦ ХФТІ НАНУ, а також на наступних міжнародних конференціях:

- 4-th International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" PLMMP-2010 (Kyiv, Ukraine, May 21 – 24, 2010);
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids QFS2010 (Grenoble, France, August 1-7, 2010);
- 3rd International Conference on Quantum Electrodynamics and Statistical Physics, QEDSP2011 (Kharkov, Ukraine, August 29- September 02, 2011);
- 4-th Conference on Statistical Physics: Modern Trends and Applications (Lviv, Ukraine, July 3-6, 2012);
- Young scientists conference "Problems of Theoretical Physics" (Kyiv, Ukraine, December 24-27, 2013);
- 6-th International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" PLMMP-2014 (Kyiv, Ukraine, May 23 – 27, 2014);
- International Conference on Quantum Fluids and Solids QFS2016 (Prague, Czech Republic, August 10-16, 2016);
- XIII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, Україна, 5-8 грудня 2017);
- XIV Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, Україна 3-5 грудня 2019).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана як частина досліджень, що проводилися у навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт, зокрема, «Рідкісні ядерні процеси і розпади, спектроскопія розпадів та структура ядер» (номер

держреєстрації 0115U000473, термін виконання 2012 р.), «Квантова теорія систем взаємодіючих фермі- та бозе-частинок» (номер держреєстрації 0117U004866, термін виконання 2017-2019 рр.), «Енергетична залежність і рефракційні властивості взаємодії легких ядер з ядрами» (номер держреєстрації 0120U102294, термін виконання 2020-2022 рр.). Роль автора дисертації в усіх роботах за науковими темами та програмами – виконавець.

Публікації. Результати, що представлені у дисертаційній роботі, опубліковано у 6 статтях [1-6] у фахових наукових виданнях, а також у 10 тезах доповідей [7-16] у збірниках праць вітчизняних та міжнародних наукових конференцій за фахом.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 125 найменувань на 10 сторінках та одного додатку. Робота містить 14 рисунків і 6 таблиць, дві з яких займають по сторінці. Загальний обсяг тексту дисертації становить 130 сторінки, обсяг основної частини складає 104 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, викладено мету, сформульовано основні завдання, фундаментальне та прикладне значення проведених досліджень, наведені об'єкти та методи досліджень. Крім цього, обґрунтовано актуальність тематики, розкрито наукову новизну і практичне значення результатів роботи. Наведено дані про особистий внесок дисертанта, подані відомості про апробацію роботи та публікації. Описано структуру дисертаційної роботи.

Перший розділ присвячено огляду теоретичних та експериментальних робіт з вивчення систем квазічастинок у квантових конденсованих середовищах за низьких температур в присутності зовнішнього поля. Проведено аналіз вихідних понять і поточного стану зазначеної галузі досліджень та обговорені недосконалості наявних підходів.

В області високих температур, де модель Дебая збудження середовища, що являє собою газ невзаємодіючих при будь-якій температурі квазічастинок – фононів, виявляється неповною, оскільки кількість фононів зростає зі збільшенням температури, і взаємодія між ними стає істотною. Температурні залежності термодинамічних коефіцієнтів, які знаходять в експериментах при високих температурах, не збігаються з передбаченнями лінійної теорії, а наявні нелінійні моделі є не до кінця обґрунтованими.

У експериментах під керівництвом О.С. Рибалко [9*] спостерігалася електрична активність надплинного гелію. Це незвичайне явище полягало в тому, що в стоячій хвилі другого звуку в He-II виникала електрична різниця потенціалів на границі резонатора. При цьому в нормальному стані гелію, а також у хвилі першого звуку, виникнення електричної різниці потенціалів не спостерігалось.

Обґрунтовано мотивацію напрямків та сформульовані завдання досліджень, які присвячені розвитку та подоланню недоліків наявних

напрацювань у цій галузі науки. Відповідям на поставлені питання і присвячені наступні розділи дисертації.

Другий розділ присвячено побудові моделі зведеного ізотропного кристала з точністю до доданків четвертого порядку за інваріантами тензора деформації у розвиненні вільної енергії. Проведено процедуру зведення опису пружних властивостей твердого тіла до ізотропного середовища. Виявлено додаткові зв'язки між згортками тензора модулів пружності восьмого рангу в тривимірному просторі. Здобуто формули для модулів пружності четвертого порядку зведеного ізотропного кристала для довільної кристалічної системи. Як приклад використання, розраховано модулі пружності четвертого порядку зведеного ізотропного кристала через згортки тензора модулів пружності деяких кристалів кубічної кристалічної системи.

У підрозділі 2.1 наведено послідовну процедуру зведення опису пружних властивостей кристала до ізотропного середовища. Було проведено розвинення густини вільної енергії твердого тіла за ступенями інваріантів тензора деформації до четвертого ступеня

$$F = F_0 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (1)$$

В розкладанні (1) доданки мають вид

$$F_2 = \frac{1}{2!} \lambda_{iklm} u_{ik} u_{lm}, \quad F_3 = \frac{1}{3!} \lambda_{iklmnp} u_{ik} u_{lm} u_{np}, \quad F_4 = \frac{1}{4!} \lambda_{iklmnpqt} u_{ik} u_{lm} u_{np} u_{qt}, \quad (2)$$

де u_{ik} – тензор деформації, λ_{iklm} , λ_{iklmnp} , $\lambda_{iklmnpqt}$ – тензори модулів пружності четвертого, шостого та восьмого рангу відповідно.

Оскільки властивості ізотропного середовища за визначенням є інваріантними по відношенню до всіх перетворень ортогональної групи, то компоненти тензорів λ повинні виражатися через комбінації компонент одиничного тензора δ_{ik} з деякими коефіцієнтами. З умови симетрії за парами індексів випливає, що тензор λ_{iklm} має дві незалежні величини λ, μ – коефіцієнти Ламе, тензор λ_{iklmnp} має три незалежні величини A, B, C – нелінійні модулі пружності Ландау, $\lambda_{iklmnpqt}$ – п'ять модулів пружності.

У підрозділі 2.2 проведено дослідження залежності згорток тензора $\lambda_{iklmnpqt}$. Виявилось, що з п'яти згорток тензора восьмого рангу у тривимірному просторі з симетріями за парами індексів незалежними є чотири. А отже, модулів, що описують нелінійні пружні властивості ізотропного середовища сім. Таким чином розвинення вільної енергії набуває вигляду

$$F = F_0 + \frac{1}{2!} (\lambda J_1^2 + 2\mu J_2) + \frac{1}{3!} (A J_1^3 + 5B J_1 J_2 + 8C J_3) + \quad (3)$$

$$+ \frac{1}{4!} (DJ_1^4 + 12EJ_1^2J_2 + 32FJ_1J_3 + 12GJ_2^2),$$

де J – інваріанти різних згорток добутку симетричних тензорів деформації (другого рангу).

У підрозділі 2.3 проведено мінімізацію виразу $|\lambda_{iklmnpqt}^{(Re)} - \lambda_{iklmnpqt}|^2$, за аналогією з роботою [1*]. А саме: провели згортку за всіма індексами, взяли похідні за D, E, F, G та прирівняли до нуля. Отриманий розв'язок системи відносно D, E, F, G , це формули для розрахунку модулів пружності ізотропного середовища через згортки тензора модулів пружності реального кристала. До таблиці 1 занесені коефіцієнти в сумі згорток для кожного модуля.

Табл. 1. Коефіцієнти для розрахунку модулів пружності ізотропного середовища через згортки тензора модулів пружності реального кристала

	МНОЖНИК	$\lambda_{iikllpp}^{(Re)}$	$\lambda_{iikllppl}^{(Re)}$	$\lambda_{iikllppk}^{(Re)}$	$\lambda_{iikllppl}^{(Re)}$	$\lambda_{iikllppi}^{(Re)}$
D	1/56700	1123	-618	-2296	-1671	3522
E	1/113400	-103	438	376	411	-1002
F	1/226800	-287	282	1184	39	-978
G	1/226800	-557	822	104	2469	-2598

Приклад застосування таблиці:

$$D = (1123\lambda_{iikllpp}^{(Re)} - 618\lambda_{iikllppl}^{(Re)} - 2296\lambda_{iikllppk}^{(Re)} - 1671\lambda_{iikllppl}^{(Re)} + 3522\lambda_{iikllppi}^{(Re)}) / 56700 \quad (4)$$

Коефіцієнти для розрахунку модулів пружності четвертого порядку D, E, F, G через експериментально виміряні модулі пружності кристалів різних сингоній зведені до таблиці в роботі [5].

У **третьому розділі** застосована узагальнена моделі Дебая, що враховує фонон-фононну взаємодію в рамках моделі самоузгодженого поля, до розрахунку термодинамічних величин кристалів кубічної кристалічної системи. В результаті проведених дослідів було здобуто параметр нелінійності для речовин з ґраткою кубічної кристалічної системи, що характеризує вплив взаємодії фононів на термодинамічні величини. Виявилось, що для більшості твердих тіл Λ позитивний, для алмазу, германію, кремнію – негативний. Розраховано середню швидкість самоузгоджених фононів. Для $\Lambda > 0$ вона зростає з температурою, у протилежному випадку спадає. Досліджено теплоємність C_v кристалів в області високих температур з урахуванням ангармонічності коливань кристалічної ґратки. Для неї знайдено лінійну за температурою поправку до закону Дюлонга – Пті для кристалів алмазу і хлориду натрію.

У підрозділі 3.1 наведено процедуру самоузгодженого опису газу фононів. Повний гамільтоніан подається у вигляді суми двох доданків [2*]

$$H = H_s + H_c, \quad (5)$$

де

$$H_s = \int \left[\frac{\pi_a^2}{2\rho} + \frac{\tilde{\lambda}}{2} \nabla_i u_a \nabla_i u_a \right] d\mathbf{r} + \varepsilon_0, \quad (6)$$

$$H_c = \int \left[\frac{1}{2} (\lambda_{aibj} - \tilde{\lambda} \delta_{ij} \delta_{ab}) \nabla_i u_a \nabla_j u_b + \tilde{U}_3 + \tilde{U}_4 \right] d\mathbf{r} - \varepsilon_0. \quad (7)$$

Самоузгоджений гамільтоніан (6) містить єдиний ефективний модуль пружності $\tilde{\lambda}$ і описує фононну систему в ізотропному наближенні, коли фонони з довільною поляризацією мають однакову швидкість. Кореляційний гамільтоніан (7) описує залишкову взаємодію, не включену в модель самоузгодженого поля.

Переходячи до квантового опису, проводячи усереднення за допомогою статистичного оператора $\hat{\rho} = \exp \beta (F - H_s)$, отримано нелінійне рівняння для перенормованої внаслідок фонон-фононної взаємодії швидкості звуку c_s

$$(\sigma^2 - 1)\sigma = \Lambda \Phi\left(\frac{\sigma}{\tau}\right), \quad (8)$$

де $\sigma \equiv c_s/c_0 = \tilde{\Theta}_D/\Theta_0$ – відношення c_s до початкової середньої швидкості звуку c_0 , або, що теж, відношення самоузгодженої енергії Дебая до стандартної. У (8) введено параметр анізотропії Λ , який містить характеристики системи, і у наближенні ізотропного середовища має вигляд

$$\Lambda \equiv \frac{\Theta_0}{32\rho M c_0^4} \left(V_0 + \frac{V_1}{3} \right), \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} V_0 &= 9\lambda + 6\mu + 6A + 32B + 32C + D + 8E + 8F + 18G, \\ V_1 &= 6\lambda + 24\mu + 4A + 48B + 88C + 8E + 40F + 10G. \end{aligned} \quad (10)$$

У підрозділі 3.2 виявлено дві якісно різні поведінки термодинамічних величин при високих температурах в залежності від знака Λ . Використання даних робіт [3*] по вимірюванню модулів пружності четвертого порядку, а також значень густини ρ і маси атома M , дозволило розрахувати параметри узагальненої теорії Дебая для самоузгоджених фононів кристалів кубічної симетрії. На знак цього параметра відсутні будь-які обмеження. Для кристалів з ґраткою типу алмаза параметр виявився від'ємним, для інших кристалів кубічної кристалічної системи – додатнім. Це відображається в температурній залежності теплоємності в області високих температур.

В теорії Дебая виконується закон відповідних станів, що складається в тому, що теплоємність є функцією безрозмірної температури $\tau = T/\Theta$. Урахування фонон-фононної взаємодії приводить до порушення цього закону, і кожна конкретна фононна система додатково характеризується своїм безрозмірним параметром Λ . Для хлориду натрію, як і для більшості речовин, він позитивний. Наслідком цього є зростання з температурою швидкості самоузгоджених фононів і лінійне по температурі відхилення від закону Дюлонга-Пті теплоємності C_v в сторону її зменшення. Для алмазу і деяких

інших алмазоподібних кристалів параметр Λ виявився негативним, так що для них швидкість фононів і енергія Дебая з температурою зменшується (рис. 1), а теплоємність C_V в високотемпературній області зростає (рис. 2).

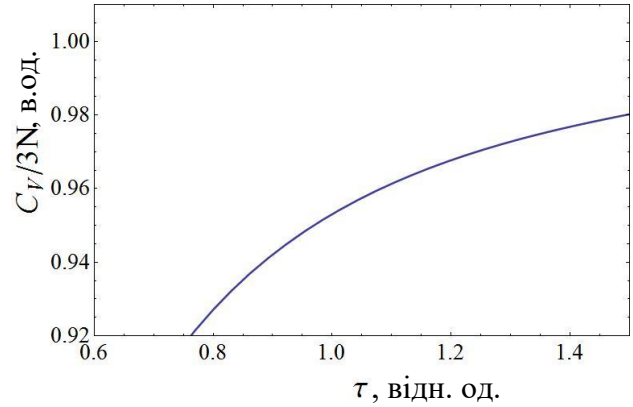
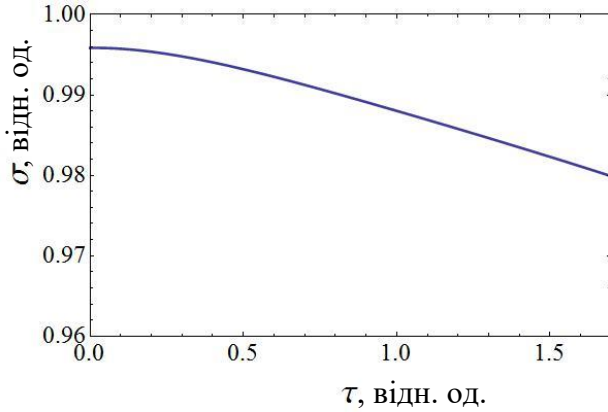


Рис. 1. Залежність швидкості самоузгоджених фононів і енергії Дебая алмаза $\sigma \equiv c_s/c_0$ від температури $\tau \equiv T/\Theta_0$. $\Lambda = -0.00817$

Рис. 2. Нормована теплоємність алмазу при постійному об'ємі, $\Lambda = -0.00817$ температури обмежена температурою плавлення

Поведінка теплоємності алмазу при високих температурах відрізняється від поведінки теплоємності більшості кристалів іншої симетрії. Тут слід розрізняти теплоємності при постійному об'ємі C_V (ізохорична) і теплоємність при постійному тиску C_p (ізобарична). Ізохорична теплоємність є більш фундаментальною величиною, але в експерименті зазвичай визначають ізобаричну теплоємність. У межі високих температур у відповідність до закону Дюлонга – Пті

$$C_V = 3N \left[1 - \frac{1}{20} \left(\frac{\Theta_D}{T} \right)^2 \right] \quad (11)$$

ізохорична теплоємність наближається до постійної величини. Різниця теплоємностей в високотемпературній межі пропорційна температурі:

$$C_p - C_V = 9n^2 \gamma_T \Gamma^2 V T \quad (12)$$

де $n = N/V$ — густина кількості частинок, $\Gamma = \partial \ln \Theta / \partial \ln n$ — параметр Грюнейзена, $\gamma_T = n^{-1} (\partial n / \partial p)_T$ — коефіцієнт ізотермічної стисливості. Таким чином, формула (12) дозволяє знайти ізохоричну теплоємність по вимірюваній ізобаричній теплоємності і величинам n , Γ , γ_T .

На рис. 3, 4 побудовані температурні залежності молярної теплоємності при постійному об'ємі алмаза та хлориду натрія. Поведінка C_V алмаза при високих температурах відрізняється від поведінки цієї величини у більшості речовин, що якісно узгоджується з розрахунками на основі запропонованої теорії, де враховується взаємодія фононів.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботі [6].

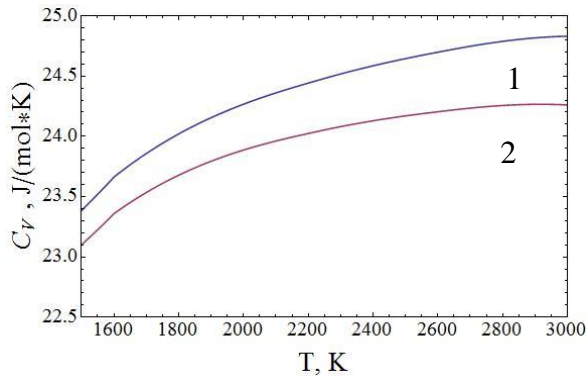


Рис. 3. Молярна теплоємність алмазу при постійному об'ємі: (1) побудована за експериментальними даними [4*]; (2) з урахуванням формули (12).

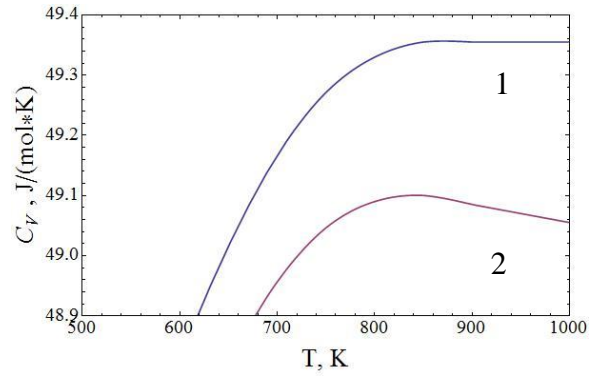


Рис. 4. Молярна теплоємність NaCl при постійному об'ємі: (1) побудована за експериментальними даними [5*]; (2) з урахуванням формули (12).

У четвертому розділі досліджено умови розповсюдження хвиль другого звуку в кристалах. В області низьких температур в газі фононів кристалічної ґратки встановлюється гідродинамічний режим, коефіцієнт теплопровідності має максимум. Відкривається можливість поширенню слабо-загасаючих теплових хвиль. У розділі розраховано області існування хвиль другого звуку в ізотопічно збіднених кристалах алмазу та фториду літія. Результати порівняно у двох моделях: зведеного ізотропного кристалу та моделі Калавея. Визначено внески до часу життя фонона кристалічної ґратки від нормальних процесів, процесів перекидання, зіткнень з ізотопами та границею твердого тіла. Розглянуто випадок, коли переважають нормальні процеси.

У підрозділі 4.1 розглянуто N- і R-процеси, і виявлено умови застосування газодинамічного опису системи фононів кристалічної ґратки:

$$\tau_N \ll \tau_R. \quad (13)$$

У підрозділі 4.2 Отримано систему газодинамічних рівнянь для квазічастинок в кристалічних діелектриках. Їх можна побудують із загальних принципів симетрії і з припущень покладених в основу газодинамічного опису. Це рівняння балансу густини імпульсу P_i і енергії квазічастинок U [6*]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial t} + \frac{\partial \Pi_{il}}{\partial x_l} &= F_i + R_i, \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \text{div} \vec{U} &= W. \end{aligned} \quad (14)$$

У цих рівняннях: \vec{F} – густина сили, що діє на квазічастинки з боку зовнішніх полів; \vec{R} – густину сили тертя із середовищем в результаті ефектів взаємодії квазічастинок, що призводять до незбереження їх імпульсу; W враховує густину джерел енергії від сторонніх полів і внесок від взаємодії квазічастинок, що відбуваються з незбереження енергії; Π_{il} – тензор щільності потоку імпульсу, а \vec{U} – густину потоку енергії.

Для ізотропного кристалу, система цих рівнянь аналогічна рівнянням Нав'є-Стокса:

$$\tilde{\rho} \dot{\vec{u}} + ST \nabla \theta = -r \vec{u} + \tilde{\eta} \Delta \vec{u} + \left(\tilde{\zeta} + \frac{\tilde{\eta}}{3} \right) \cdot \nabla \operatorname{div} \vec{u}, \quad (15)$$

$$C \dot{\theta} + S \operatorname{div} \vec{u} = \tilde{\kappa} \Delta \theta.$$

Коефіцієнту r можна дати наступної фізичної інтерпретації. В однорідному випадку перше рівняння в (15) буде мати вигляд: $\tilde{\rho} \dot{\vec{u}} = -r \vec{u}$. Розв'язок цього рівняння $\vec{u} = \vec{u}_0 e^{-r/\tilde{\rho}}$ дає можливість інтерпретувати $r/\tilde{\rho}$ як час релаксації дрейфової швидкості до нуля.

У підрозділі 4.3 проведені оцінки коефіцієнтів в'язкості $\tilde{\eta}$ та теплопровідності $\tilde{\kappa}$ квазічастинок, що входять (15). Використовуючи оцінки для швидкості зміни ентропії [6*] отримана нижня межа величин кінетичних коефіцієнтів що входять в рівняння газодинаміки квазічастинок.

У підрозділі 4.4 проведено розрахунок області існування хвиль другого звуку (ХДЗ) в алмазі з урахуванням границі і концентрації домішок ізотопів. Для розв'язання рівнянь (15) всі змінні вважають пропорційними $\exp[i(\Omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})]$ з частотою Ω і хвильовим вектором \vec{k} . З умови спільності системи рівнянь отримано дисперсійне рівняння для вторинних хвиль:

$$\Omega(\Omega^2 - W_{II}^2 \tilde{k}^2) - 2i W_{II}^2 \tilde{k}^2 \Gamma_{II} = 0. \quad (16)$$

З дисперсійного рівняння (16) випливає, що W_{II} є фазовою швидкістю вторинних хвиль і величина Γ_{II} коефіцієнт загасання вторинних хвиль. Вирази для W_{II} і Γ_{II} мають простий вигляд для вторинних хвиль в ізотропному газі квазічастинок:

$$W_{II} = (TS^2/C\tilde{\rho})^{1/2}, \quad \Gamma_{II} = \frac{r}{2\tilde{\rho}} + \left[\frac{1}{2\tilde{\rho}} \left(\frac{4}{3} \tilde{\eta} + \tilde{\zeta} \right) + \frac{1}{2C} \tilde{\kappa} \right] \tilde{k}^2. \quad (17)$$

Для фононного газу в низькотемпературній області $\Theta_D/T \gg 1$ в моделі зведеного ізотропного кристала отримані наступні вирази $C = 3S = \frac{2\pi^2}{15} \frac{k_b^4 T^3}{\hbar^3 V_t^3} (2 + \beta^3)$, $\tilde{\rho} = \frac{2\pi^2}{45} \frac{k_b^4 T^4}{\hbar^3 V_t^5} (2 + \beta^5)$, $\Theta_D = 2\pi\hbar V_s/k_B a$. Швидкість другого звуку має вигляд:

$$W_{II} = \frac{V_t^2}{3} \left(\frac{2 + \beta^3}{2 + \beta^5} \right). \quad (18)$$

Якщо ввести дифузійні часи наступними співвідношеннями:

$$\tau_{\tilde{\eta}} = \frac{\tilde{\eta}}{\tilde{\rho} W_{II}^2}; \quad \tau_{\tilde{\zeta}} = \frac{\tilde{\zeta}}{\tilde{\rho} W_{II}^2}; \quad \tau_{\tilde{\kappa}} = \frac{\tilde{\kappa}}{C W_{II}^2}; \quad \tau_R = \frac{\tilde{\rho}}{r}, \quad (19)$$

то величина Γ_{II} може бути записана у вигляді:

$$\Gamma_{II} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau_R} + \left(\frac{4}{3} \tau_{\tilde{\eta}} + \tau_{\tilde{\zeta}} \right) \Omega^2 + \tau_{\tilde{\kappa}} \Omega^2 \right] \quad (20)$$

Умова існування слабо згасаючих ХДЗ ($\Gamma_{II} \ll \Omega$) приводить до наступної умови, що накладаються на частоту Ω , відомому як "вікно" існування ХДЗ:

$$\min\{\nu_{\tilde{\eta}}, \nu_{\tilde{\zeta}}, \nu_{\tilde{\kappa}}\} \gg \Omega \gg \nu_R, \quad (21)$$

де частоти зіткнень ν_i пов'язані з дифузійними часом τ_i співвідношеннями $\nu_i = 1/\tau_i$.

Урахування розсіювання фононів на границях здійснюється використовуючи відношення між довжиною вільного пробігу за рахунок нормальних процесів $l_N = \tau_N V_S$ і розміром зразка D . Якщо виконується відношення $l_N \gg D$, то ефективна довжина вільного пробігу фононів збігається з розмірами зразка, і частота розсіювання на кордоні визначається як: $\nu_B = V_S/D$. ХДЗ існують в діелектриках при газодинамічному режимі опису фононів, який реалізується якщо виконується нерівність $l_N \ll D$. Фонон в об'ємі зразка відчуває безліч нормальних зіткнень до досягнення границі. В результаті шлях, який проходить фонон до зіткнення з границею, істотно зростає. Використовуючи добре відомі формули броунівського руху легко бачити, що траєкторії між двома зіткненнями з границею буде порядку D^2/l_N . Це означає, що ефективна частота зіткнення фононів з границею буде:

$$\nu_{Beff} = \frac{V_S^2}{D^2 \nu_N} = \frac{\nu_B^2}{\nu_N}. \quad (22)$$

Умова існування ХДЗ виконуються, якщо частота другого звуку задовольняє нерівності:

$$\Omega_{II} \geq 10\Gamma_{II}. \quad (23)$$

З цього співвідношення можна отримати нижню і верхню межі частоти ХДЗ:

$$0.1\nu_N - \sqrt{10^{-2}\nu_N^2 - \nu_N\nu_R} \leq \Omega_{II} \leq 0.1\nu_N + \sqrt{10^{-2}\nu_N^2 - \nu_N\nu_R}. \quad (24)$$

Отримано формули для частот зіткнень в моделі зведеного ізотропного кристала, враховуючи, що законами збереження енергії та квазіімпульса дозволені такі процеси перекиду $t + t \leftrightarrow l + b_g$ і $l + t \leftrightarrow l + b_g$.

$$\nu_N = \nu_{\tilde{\eta}} = \frac{2\pi^2}{45} (2 + \beta^3) \frac{k_B^5}{\hbar^4} \frac{T^5}{\alpha_{\tilde{\eta}} \rho V_l^2 V_t^3},$$

$$\nu_U = A_1 T^{-3} e^{-\frac{\Theta_1}{T}} + A_2 T^{-1} e^{-\frac{\Theta_2}{T}}, \quad \nu_B = \frac{V_S}{D} \quad (25)$$

$$\nu_{iso} = 61,76 \cdot a^3 \left(\frac{k_B}{\hbar} \right)^4 (2 + \beta^3) T^4 C_d (\Delta M/M)^2$$

$$\text{де } A_1 = \frac{3\pi^3 \beta^2 (15 - 10\beta^2 + 3\beta^4)}{4(1 + \beta)^6 (2 + \beta^5)} (1 + \bar{b} + \bar{g})^2 \frac{\hbar^4 V_l^3}{k_B^3 \rho a^8},$$

$$\Theta_1 = \frac{2\pi\beta V_l \hbar}{k_B (1 + \beta) a},$$

$$A_2 = \frac{45\pi(1 - \beta)(7 - 5\beta)}{64(1 + \beta)(2 + \beta^5)\beta^2} (1 + \beta^2 + 2\bar{b} + 4\bar{g})^2 \frac{\hbar^2 V_l}{k_B \rho a^6},$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi(1 + \beta) V_l \hbar}{2k_B a},$$

$C_d = \frac{N_i}{N}$ – концентрація ізопоів, ΔM – різниця між атомними масами ізопоів і основної речовини, M – маса основних атомів, D – розміри зразка, $\alpha_{\eta} \sim 10^{-2}$.

З нерівності (21) отримано "вікно" існування ХДЗ в монокристалі алмазу в моделі зведеного ізопоного кристала (рис 5).

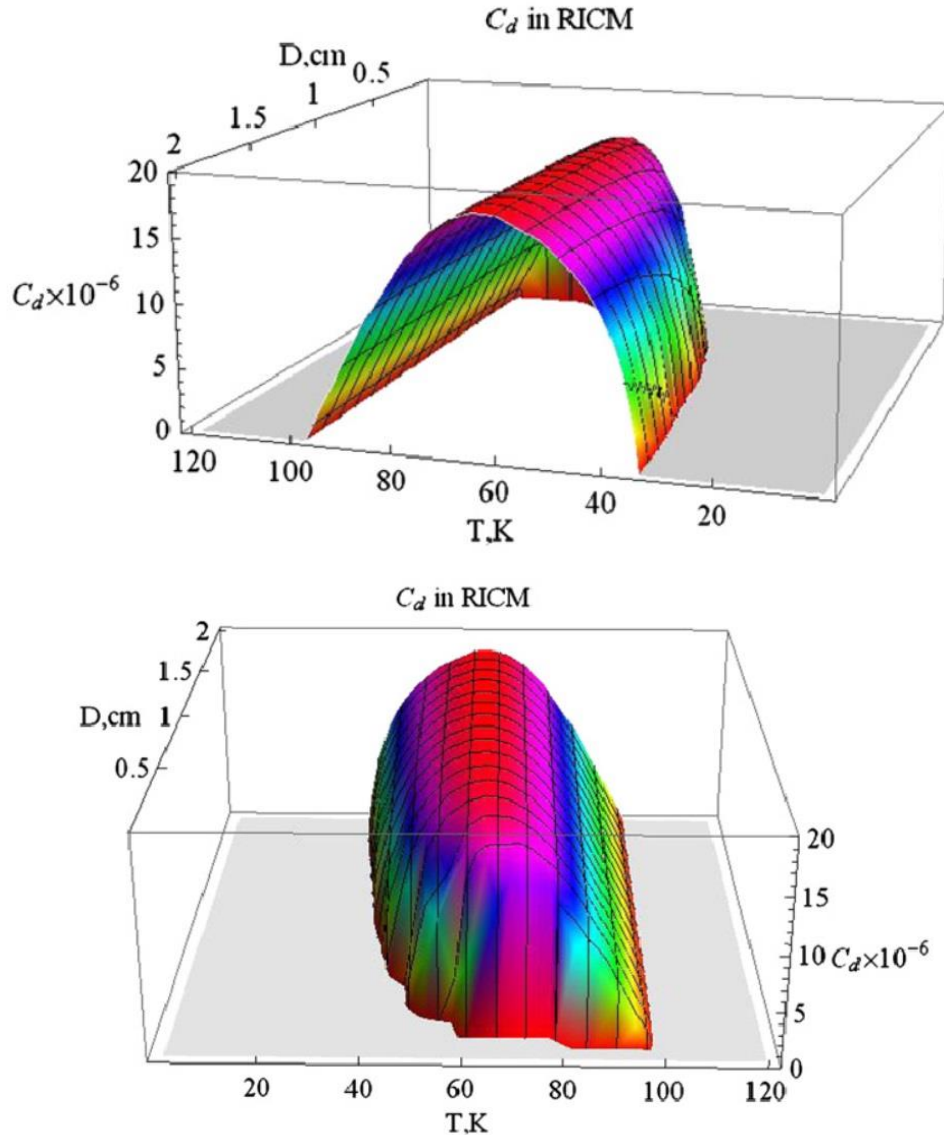


Рис.5. Область існування хвиль другого звуку в моделі зведеного ізопоного кристала. для всіх можливих співвідношень концентрацій ізопоів і розміру зразка.

У підрозділі 4.5. проведені аналогічні розрахунки області існування ХДЗ в LiF в моделі зведеного ізопоного кристала і моделі Калавея. У діапазоні низьких температур в моделі Калавея [7*] для опису експериментальних даних по теплопровідності фторида літія використовуються наступні частоти зіткнень фононів, викликані нормальними і процеси перекиду, а також процесами розсіювання на ізопоах:

$$\begin{aligned}
\nu_N &= 6,6 \cdot T^5 \text{ c}^{-1} \\
\nu_U &= 1,7 \cdot 10^{16} \cdot T^{-3} \exp\left(-\frac{\Theta_1}{T}\right) + 6,9 \cdot 10^{12} \cdot T^{-1} \exp\left(-\frac{\Theta_2}{T}\right), \\
\nu_{iso} &= 3,27 \cdot 10^4 \cdot T^4 C_{iso} \text{ c}^{-1}, \quad \Theta_1 = 326K, \\
\nu_{Beff} &= 3,45 \cdot 10^{10} \cdot D^{-2} \cdot T^{-5} \text{ c}^{-1}, \quad \Theta_2 = 346K.
\end{aligned} \tag{26}$$

Побудовано поверхні, що обмежують область існування ХДЗ у фториді літія.

Таким чином, в чистих ідеальних монокристалах основний внесок в загасання хвиль другого звуку буде давати ізотопічні розсіювання фононів. Сучасні технології дають можливість отримувати ізотопічно чисті ідеальні монокристали, на основі яких можна побудувати пристрої виміру ізотопічного складу речовини. Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [2,4].

У **п'ятому розділі** вирішена задача про виникнення електричного потенціалу в хвилях другого звуку в надплинному гелії. Розраховано коефіцієнтів, які задають зв'язок між різними величинами, що коливаються в ХДЗ.

У підрозділі 5.1 висунуто гіпотезу існування дипольного моменту ротонів. Вважається що механізм виникнення дипольного моменту ротона є інерційним, тобто таким що виникає внаслідок суттєвої відмінності мас двох електронів атома гелію і ядра, маса якого на три порядки більша. При дії на обраний атом сили електричної природи прискорення одержувані електронною оболонкою і ядром також будуть відрізнятися на три порядки. Оскільки ротон є локалізованим збуренням густини гелію без центральної симетрії, то вплив, який вчиняється на обраний атом з боку сусідніх, є не компенсованим, що і є умовою інерціального механізму. У роботі отримано збіг величини такого дипольного моменту ротонів з оцінкою в експерименті [8*]. Складаючи коефіцієнт пропорційності дипольного моменту з груповою швидкістю ротонів з характерних величин, має

$$\vec{d} = \gamma \frac{2e\hbar}{\Delta} \frac{(p - p_0)}{\mu} \frac{\vec{p}}{p} = \alpha \frac{(p - p_0)}{\mu} \frac{\vec{p}}{p}, \tag{27}$$

де $\Delta(\rho_0) = 8,65^\circ K$, $p_0/\hbar = 1,9 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-1}$, $\mu = 0,16 m_{He} = 2 \cdot 10^{-24} \text{ g}$, γ – безрозмірний коефіцієнт, що виявляється порядку одиниці.

У підрозділі 5.2 знайдено рівняння дворідинної гідродинаміки надплинного гелію з урахуванням електричного поля.

$$\begin{cases} \dot{\rho} + \text{div} \vec{j} = 0 \\ \dot{j}_i = -\frac{\partial}{\partial x_i} (P \delta_{il} + j_i v_{n_l} + j_l v_{s_i}), \\ \dot{S} + \text{div} (S \vec{v}_n) = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{\vec{v}}_s + (\vec{v}_s \nabla) \vec{v}_s = -\nabla \mu \\ \left[\vec{j}, \text{rot} \vec{v}_s \right]_i + \frac{D_l}{4\pi} \frac{\partial E_l}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \tag{28}$$

У підрозділі 5.3 виявлено причини поляризації надплинного гелію при поширенні ХДЗ. Оскільки гідродинаміку гелію при температурі більше 0.8 К визначають ротони, то природно зв'язати спостережувану електричну активність саме з підсистемою ротонів. У рівновазі сумарний дипольний момент дорівнює нулю, як і повний імпульс. У разі, коли на ротони діє зовнішнє поле (надплинної складової, електричне поле) розподіл квазічастинок перестає бути ізотропним, сумарний дипольний момент ротонів перестає бути нульовим, і, як наслідок, проявляється макроскопічна поляризованість гелію, що реєструється у вигляді потенціалу [8*]. З ліанеризованої системи (28) випливає зв'язок поляризації та відносної швидкості компонент

$$\vec{P} = \frac{2\alpha}{9} \vec{w} N_r. \quad (29)$$

де \vec{w} – амплітуда відносної швидкості в другому звуці, α з (27)

$$\alpha = \frac{2e\hbar}{\Delta}. \quad (30)$$

У підрозділі 5.4 отримано зв'язок амплітуди відносної швидкості і коливань температури T' в другому звуці з використанням характеристик гелію при $T = 1,4\text{ K}$. А саме, вважаючи, що швидкість другого звуку дорівнює $u_2 \approx 19,7\text{ м/с}$, а ентропія $\bar{S} = 0,132 \cdot \text{Дж/г} \cdot \text{K}$, $N_r \approx 10^{20}\text{ см}^{-3}$, отримано $w \approx 10^4 \cdot T'$, де T' в °K, w в см/с. Підставляючи ці дані в $|\vec{P}| = E/4\pi = \Delta U / 4\pi d$, і вважаючи що поле створює поляризація (29), отримуємо

$$\frac{\Delta U}{T'} \approx 10^{-2} \frac{2e}{k_B}. \quad (31)$$

А для середнього дипольного моменту

$$d \approx \frac{4.8 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-27}}{8.6 \cdot 1.4 \cdot 10^{-16}} \cdot 1 \approx 10^{-22} \text{ сгс} e_q, \quad (32)$$

що збігається з результатами експериментів [8*].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі надається узагальнення квазічастинкової моделі опису квантових конденсованих середовищ на випадок сильної взаємодії квазічастинок між собою і слабкої із зовнішнім полем. Це дає змогу з єдиної точки зору пояснити екзотичні прояви електричної активності надплинного гелію та нелінійні властивості кристалів.

У ході виконання роботи були уперше здобуті такі фізичні результати:

1. Розширено модель опису нелінійних пружних властивостей твердого тіла як ізотропного середовища, яка враховує трьох- та чотирьохчастинкові взаємодії фононів. Виявилось, що для цього потрібно дев'ять модулів пружності, чотири з яких модулі четвертого рангу.

2. Розроблено техніку розрахунку модулів пружності четвертого рангу ізотропного середовища еквівалентного до реальних кристалів з симетрією довільної кристалічної системи. Здобуто модулі пружності четвертого рангу для багатьох речовин з кубічною кристалічною ґраткою.

3. Розраховано параметр анізотропії кристалічної ґратки, який характеризує взаємодію фононів між собою, для різних речовин кубічної кристалічної системи. Для більшості твердих тіл він є позитивним, для алмазу, германію, кремнію – негативним.

4. Розраховано відхилення ізохоричної теплоємності алмаза, германію, хлориду натрія за високих температур від закону Дюлонга-Пті.

5. Уперше розраховано області існування хвиль другого звуку в кристалах алмазу та фториду літія в залежності від температури, концентрації ізотопів та розміру кристала. Ця область співпадає з температурним вікном гідродинамічного режиму взаємодії фононів.

6. Побудовано замкнену систему рівнянь дворідинної гідродинаміки надплинного гелію у випадку зачеплення однієї з компонент із зовнішнім електричним полем. Доведено, що при відносному русі складових гелію виникає електрична поляризація рідини.

7. Обчислено вектор поляризації надплинного гелію, обумовлений тепловими хвилями. Знайдений середній дипольний момент ротона узгоджуються з експериментальними даними.

Таким чином, усі поставлені задачі виконані, і мета дисертаційної роботи досягнута. Одержані результати верифікують основні положення квазічастинкової моделі опису властивостей конденсованих середовищ та розширюють границі застосування на випадок коли густина квазічастинок перевищує густину атомів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ходусов В.Д., Наумовец А.С. Уравнения двухжидкостной гидродинамики сверхтекучего гелия с учетом электрического поля. *Вісник ХНУ. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2010. № 899, вип.2. С.44–49.

2. Khodusov V.D., Naumovets A.S. Second sound waves in diamond. *Diamond and Related Materials*. 2012. Vol. 21. P. 92 – 98. (квартиль Q2)

3. Khodusov V.D., Naumovets A.S. On the effect of superfluid flows on the interaction of microwaves with He II. *Condensed Matter Physics*. 2012. Vol. 15, №4. P. 43601. (квартиль Q3)

4. Khodusov V.D., Naumovets A.S. About conditions of existence of second sound waves in isotropically enriched crystals ^7LiF . *East European Journal of Physics*. 2015. Vol. 2, № 2. P. 59 – 64.

5. Burlayenko O., Khodusov V., Naumovets A. Reduced isotropic crystal model with respect to the fourth-order elastic moduli. *East European Journal of Physics*. 2018. Vol.5, № 1. P. 70 – 73.

6. Naumovets A.S., Poluektov Yu.M., Khodusov V.D. Nonlinear Effects in the Phonon System of Diamond Crystal. *East European Journal of Physics*. 2020. № 2. P. 124 – 135.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Khodusov V.D., **Naumovets A.S.** Interaction of electromagnetic waves with superfluid helium. *International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" PLMMP-2010: Book of abstracts* (Kyiv, Ukraine, May 21-24, 2010). Kyiv, 2010. P. 327.
8. Khodusov V.D., **Naumovets A.S.** Features of interaction of microwaves with He-II. *International Symposium on Quantum Fluids and Solids 2010: Book of abstracts* (Grenoble, France, August 1-7, 2010). Grenoble, 2010. P. 32.
9. Khodusov V.D., **Naumovets A.S.** About absorption of low-frequency electromagnetic waves in superfluid helium. *3rd International Conference Quantum Electrodynamics and Statistical Physics: Book of abstracts* (Kharkov, Ukraine, August 29 - September 2, 2011). Kharkov, 2011. P. 147.
10. **Naumovets A. S.**, Khodusov V. D. The absorption of the variable electric field in superfluid helium by the Akhiezer mechanism. *3rd International Conference Quantum Electrodynamics and Statistical Physics: Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigation. 2012. Vol. 57, № 1. P. 296–298.* (квартиль Q3)
11. Khodusov V.D., **Naumovets A.S.** About influence of the superfluid flows on interaction of SHF waves with He. *4-th Conference on Statistical Physics: Modern Trends and Applications: Book of abstracts* (Lviv, Ukraine, July 3-6, 2012). Lviv, 2012. P. 120.
12. **Naumovets A.S.** Resonant Absorption in Superfluid Helium. *Young scientists conference "Problems of Theoretical Physics": Book of abstracts* (Kyiv, Ukraine. December 24-27, 2013). Kyiv, 2013. P. 23.
13. Khodusov V.D., **Naumovets A.S.** On the possibility of excitation of microwaves by a heat flows in the superfluid helium. *6-th International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" PLMMP-2014: Book of abstracts* (Kyiv, Ukraine, May 23-27, 2014). Kyiv, 2014. P. 158.
14. Khodusov V.D., **Naumovets A.S.** Microwaves radiation by roton streams in superfluid helium. *International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016: Book of abstracts* (Prague, Czech Republic, August 10-16, 2016). Prague, 2016. P. 96.
15. **Наумовець А.С.**, Полуектов Ю.М., Ходусов В.Д. Термодинамика взаємодіючих самоузгоджених фононів в кристалах. *XIII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах»: Збірка тез* (Харків, Україна 5-8 грудня, 2017). Харків, 2017. С. 33.
16. **Наумовець А.С.**, Полуектов Ю.М., Ходусов В.Д. Nonlinear effects in the phonon system of diamond crystal. *XIV Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах»: Збірка тез* (Харків, Україна, 3-5 грудня, 2019). Харків, 2019. С.58.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Федоров Ф.И. *Кристаллография*. 1963. Т. 8. С.213.
- 2*. Полуектов Ю.М. Самосогласованное описание системы взаимодействующих фононов. *ФНТ*. 2015. Т. 41, № 11. С. 1181–1190.

3*. Shanker J., Singh J. P. Third- and fourth-order elastic constants for silver halides, alkaline earth oxides, and chalcogenides of Pb and Sn. *Phys. Stat. Sol.* 1982. V.70, Issue 2. P. 677-681.

4*. Reeber, R.R. & Wang, K. JEM, Thermal expansion, molar volume and specific heat of diamond from 0 to 3000K. *Journal of Electronic Materials*, 1996. V. 25. P. 63-67.

5*. Wang, K. & Reeber, R.R., Thermal expansion of alkali at high pressure: NaCl as an example. *Phys. Chem. Minerals*. 1996. V.23, P.354-360.

6*. Ахиезер А.И., Алексин В.Ф., Ходусов В.Д. Газодинамика квазичастиц. I. Общая теория. *ФНТ*. 1994. Т. 20, № 12. С. 1199 – 1238.

7*. Kamatagi M., Sankeshwar N., Mulimani B. Thermal conductivity of GaN. *Diamond Relat. Mater.* 2007. V. 16, P. 98.

8*. Rybalko A.S., Rubets S.P., Rudavskii E.Y. et al. The influence of the stationary electric field upon the resonance absorption of microwaves in He-II. *arXiv e-prints*. 2008. 0807.4810.

9*. Rybalko A.S. Observation of the electric induction due to a second-sound wave in He II. *Low Temp. Phys.* 2004. V. 30. P. 994.

АНОТАЦІЯ

Наумовець А.С. Опис термодинамічних властивостей кристалів та надплинного гелію з урахуванням зовнішніх полів та взаємодії квазічастинок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.02 – теоретична фізика (104 – Фізика та астрономія). – Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна МОН України – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним дослідженням поведінки квазічастинкових систем в твердих тілах в області високих та низьких температур, а також у надплинному гелію за наявності зовнішнього електричного поля.

Основою побудування сучасної теорії слабо збуджених станів конденсованих середовищ є квазічастинкова модель, в якій всі макроскопічні властивості середовища повністю визначаються мікроскопічними властивостями газу теплових квазічастинок – фононів, ротонів, магнонів тощо. Опис коливань кристалічної ґратки за допомогою моделі газу невзаємодіючих фононів є вдалим прикладом. В той же час, в області високих температур густина фононів виявляється значною і може перевищувати густину частинок середовища, а отже, взаємодія між фононами стає більш істотною. Як наслідок, для адекватного опису нелінійних властивостей середовища потрібна узагальнена модель Дебая, яка оперує тензорами модулів пружності третього і четвертого порядку. Для кристала довільної симетрії останній має більше шести тисяч елементів, з яких (для найбільш несиметричних кристалів триклинної кристалічної системи) 126 є незалежними. В дисертаційній роботі продемонстровано спосіб зведення опису пружних властивостей кристалів

довільної симетрії до властивостей ізотропного середовища еквівалентного до реальних кристалів. Здобуто модулі пружності четвертого рангу цього середовища. Побудована дев'ятиконстантна модель опису твердого тіла. Розраховано величину параметра анізотропії кристалічної ґратки для різних речовин кубічної кристалічної системи. Виявлено різний характер поведінки теплоємності за високих температур в залежності від знака параметра анізотропії.

В області низьких температур в газі фононів кристалічної ґратки встановлюється гідродинамічний режим, коефіцієнт теплопровідності має максимум. Відкривається можливість поширенню слабо-загасаючих теплових хвиль. У дисертаційній роботі розраховано області існування хвиль другого звуку в ізотопічно збіднених кристалах алмазу та фториду літію. Результати отримані в моделі зведення властивостей реального кристала до ізотропного середовища і моделі Калавея, добре узгоджуються. Визначено внески до часу життя фонона кристалічної ґратки від нормальних процесів, процесів перекидання, зіткнень з ізотопами та границею твердого тіла. Розглянуто випадок, коли переважають нормальні процеси.

В новітніх експериментах з надплинним гелієм спостерігалася електрична активність. А саме при поширенні хвиль другого звуку крізь об'єм He-II виникала електрична різниця потенціалів на стінках резонатора. При цьому в нормальному стані гелію, а також в хвилі першого звуку, виникнення електричної різниці потенціалів не спостерігалось.

У дисертаційній роботі доведено, що при русі надплинної складової ^4He стосовно системи квазічастинок надплинного гелію виникає електричне поле, обумовлене електричними властивостями квазічастинок гелію – ротонами. Знайдено систему рівнянь дворідинної гідродинаміки надплинного гелію з урахуванням зовнішнього електричного поля. Обчислено вектор поляризації, обумовлений дипольними моментами ротонів. Знайдені залежності різниці потенціалів від температури і відносної швидкості руху узгоджуються з експериментальними даними.

Ключові слова: теплоємність твердих тіл, надплинний гелій, температура Дебая, ротони, процеси вирівнювання, швидкості нормальної та надплинної складових, взаємодія фононів, поляризація гелію.

АННОТАЦІЯ

Наумовець А.С. Описание термодинамических свойств кристаллов и сверхтекучего гелия с учетом внешних полей и взаимодействия квазичастиц. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика (104 – Физика и астрономия). – Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина МОН Украины – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена теоретическим исследованиям поведения квазичастичных систем в твердых телах в области высоких и низких

температур, а также в сверхтекучем гелии при наличии внешнего электрического поля.

Основой построения современной теории слабо возбуждённых состояний конденсированных сред является модель квазичастиц, в которой все макроскопические свойства среды полностью определяются микроскопическими свойствами газа тепловых квазичастиц – фононов, ротонов, магнонов и т.д. Описание колебания кристаллической решетки с помощью модели газа невзаимодействующих фононов является удачным примером. В то же время, в области высоких температур плотность фононов оказывается значительной и может превышать плотность частиц среды, а следовательно, взаимодействие между фононами становится более существенным. Как следствие, для адекватного описания нелинейных свойств среды нужна обобщенная модель Дебая, которая оперирует тензорами модулей упругости третьего и четвертого порядка. Для кристалла произвольной симметрии последний имеет более шести тысяч элементов, из которых (для наименее симметричных кристаллов триклинной сингонии) 126 являются независимыми. В диссертационной работе продемонстрирован способ сведения описания упругих свойств кристаллов произвольной симметрии к свойствам изотропной среды эквивалентной к реальным кристаллам. Получены модули упругости четвертого порядка этой среды. Построена девяти константная модель описания твердого тела. Рассчитана величина параметра анизотропии кристаллической решетки для различных веществ кубической сингонии. Выявлен разный характер поведения теплоемкости при высоких температурах в зависимости от знака параметра анизотропии.

В области низких температур в газе фононов кристаллической решетки устанавливается гидродинамический режим, коэффициент теплопроводности имеет максимум. Открывается возможность распространения слабо-затухающих тепловых волн. В диссертационной работе рассчитана область существования волн второго звука в изотопически обедненных кристаллах алмаза и фторида лития. Результаты полученные в модели сведения свойств реального кристалла к изотропной среде и модели Калавея, находятся в хорошем согласии. Определены вклады во времена жизни фонона кристаллической решетки от нормальных процессов, процессов переброса, столкновения с изотопами и границей твердого тела. Рассмотрен случай, когда преобладают нормальные процессы.

В новейших экспериментах со сверхтекучим гелием наблюдалась электрическая активность. А именно при распространении волн второго звука через объем He-II возникала электрическая разность потенциалов на стенках резонатора. При этом в нормальном состоянии гелия, а также в волне первого звука, возникновение электрической разности потенциалов не наблюдалось.

В диссертационной работе доказано, что при движении сверхтекучей составляющей ^4He относительно системы квазичастиц сверхтекучего гелия возникает электрическое поле, обусловленное электрическими свойствами квазичастиц гелия – ротонами. Найдено систему уравнений двухжидкостной гидродинамики сверхтекучего гелия с учетом внешнего электрического поля.

Вычислен вектор поляризации, обусловленный дипольными моментами ротонов. Найденные зависимости разности потенциалов от температуры и относительной скорости движения согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: теплоемкость твердых тел, сверхтекучий гелий, температура Дебая, ротоны, процессы выравнивания, скорости нормальной и сверхтекучей компонент, взаимодействие фононов, поляризация гелия.

ABSTRACT

Naumovets A.S. Description of the thermodynamic properties of crystals and superfluid helium, taking into account external fields and the interaction of quasiparticles. – Manuscript copyright.

Thesis for scientific degree of candidate of science in physics and mathematics by speciality 01.04.02 – theoretical physics (104 – Physics and Astronomy). – Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine – National Scientific Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology” of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2021.

This thesis is devoted to theoretical research of the properties of quasiparticles systems in solids at high and low temperatures, and in superfluid helium in the presence of an external electric field.

For a crystal of arbitrary symmetry, the fourth order tensors of elastic moduli has more than six thousand elements, of which 126 (for the least symmetric triclinic crystals) are independent. To simplify the description of the elastic properties of crystals, a model of an isotropic medium equivalent to the properties of real crystals is developed. The fourth-order elastic moduli of this medium are obtained. A nine-constant model for describing a solid is constructed. The value of the anisotropy parameter of the crystal lattice is calculated for various substances of cubic crystal system. Different behavior of the heat capacity at high temperatures was revealed depending on the sign of the anisotropy parameter.

At low temperatures, a hydrodynamic regime is established in the phonon gas of the crystal lattice, and the thermal conductivity coefficient has a maximum. The possibility of the propagation of weakly damped heat waves occurs. The region of existence of the second sound waves in crystals of diamond and lithium fluoride is calculated. The contributions to the phonon lifetime from normal processes, umklapp processes, scattering on isotopes and boundaries of a solid are determined. The case when normal processes predominate is considered.

In the thesis, it is proved that the properties of the quasiparticles– rotons – play main role in electrical activity of superfluid helium, when the components of He-II are in relative motion. Equations of two-fluid hydrodynamics of superfluid helium accounting an external electric field are found. The polarization vector due to the dipole moments of rotons is calculated.

Key words: heat capacity of solids, superfluid helium, Debye temperature, rotons, equalization processes, velocities of normal and superfluid components, phonon interaction, helium polarization.