

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Григорчака Ореста Івановича “Мікроскопічна теорія бозе-рідини з урахуванням прямих три- і чотиричастинкових кореляцій”, подану на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 — теоретична фізика

Незважаючи на велику різноманітність досліджуваних систем, рідкий гелій з його унікальними властивостями до цього часу привертає значну увагу вчених, а дослідження в цьому напрямку не втрачають актуальності, оскільки допомагають зрозуміти основні фізичні причини появи бозе-конденсації частинок та явища надплинності. Належного теоретичного мікроскопічного опису, який би працював в усій області температур, ще не існує до цього часу. Для теоретичного вивчення багаточастинкових систем, зокрема тих, які описуються Бозе-Айнштайнівською статистикою, досить ефективним виявився метод колективних змінних. За допомогою цього методу вдалося побудувати мікроскопічну теорію рідкого гелію в широкому діапазоні температур через розрахунок матриці густини.

Однак більшість результатів отримано в наближенні хаотичних фаз, яке враховує лише парні кореляції. Мета досліджень представленої дисертації полягала у врахуванні три- і чотиричастинкових кореляцій, які суттєво впливають на теоретичні висновки стосовно досліджуваної системи, оскільки залишається проблема кількісного і якісного аналізу температурної поведінки бозе-рідини. Вивченню цих важливих питань і присвячена дисертація.

Сама дисертація викладена на 185 сторінках машинописного тексту і складається з семи розділів та висновків. Для ілюстрації приведена відповідна кількість рисунків. Список використаних джерел містить 255 посилань.

У **першому** розділі проведений аналіз історії досліджень рідкого гелію і сучасний стан проблем, пов'язаних з його вивченням, а також огляд літератури, що відноситься до теми дисертаційної роботи.

У **другому** розділі знайдена повна матриця густини багатобозонної системи в представлені колективних змінних у  $post$ -RPA наближенні, яка має вигляд добутку матриці густини ідеального бозе-газу на фактор, який враховує дво-, три- і чотиричастинкові кореляції. У границі низьких та високих температур знайдений вираз відтворює вже відомі результати, що є підтвердженням коректності розрахунків.

У **третьому** розділі, використовуючи матрицю густини, отриману у попередньому розділі, визначено статистичну суму у вигляді добутку статистичної суми у RPA наближенні на фактор, який враховує багаточастинкові кореляції в границі низьких температур, де статистична сума має вигляд больцманівського фактора з енергією основного стану. Показано, що при високих температурах головний внесок у статистичну суму роблять парні кореляції, оскільки роль багаточастинкових кореляцій зменшується з ростом температури. В процесі розрахунку отримано вираз для якобіана переходу від декартових до колективних змінних для ненульових температур.

У **четвертому** розділі знайдена температурна залежність ефективної маси атома  ${}^4\text{He}$ . У границі високих температур ефективна маса переходить у масу “голого” атома гелію, як і повинно бути. Отримана ефективна маса зміщує температуру бозе-конденсації від  $T_c=3.14\text{K}$  для ідеального бозе-газу до  $T_c=2.18\text{K}$ , що є дуже близьким до температури  $\lambda$ -переходу в рідкому  ${}^4\text{He}$  ( $T_c=2.17\text{K}$ ). В процесі розрахунку вдалося показати, що в критичній точці вигляд одночастинкового спектру колективних збуджень є пропорційним до степеня хвильового вектора, меншого за двійку. Отримане значення критичного індексу відрізняється від результату Монте Карло симуляцій, оскільки воно було знайдене лише в наближенні хаотичних фаз, яке відтворює тільки перший член розкладу за оберненими степенями вимірності параметра порядку.

У **п'ятому** розділі на основі повної матриці густини розраховано дво-, три- і чотиричастинковий структурні фактори в наближенні “однієї суми за хвильовим вектором”. При високих температурах вони редукуються до виразів для структурних факторів ідеального бозе-газу. В межі низьких температур вираз для парного структурного фактора відтворює вже відомі результати. Проведено чисельний розрахунок двочастинкового структурного фактора при різних температурах і з використанням отриманого виразу для ефективної маси атома  ${}^4\text{He}$ . І, що важливо, зроблено також порівняння з експериментальними даними.

У **шостому** розділі, користуючись точним співвідношенням, яке пов'язує довгохвильову асимптотику двочастинкового структурного фактора і швидкість звуку в бозе-системі, вдалося знайти температурну поведінку останньої як в докритичній, так і післякритичній області в наближенні “однієї суми за хвильовим вектором”, що відповідає post-RPA наближенню. У границі високих і низьких температур отриманий вираз відтворює відомі результати. Post-RPA наближення дає якісно правильну температурну поведінку швидкості першого звуку в рідкому  ${}^4\text{He}$  у післякритичній області, натомість наближення хаотичних фаз показує

повільний ріст величини швидкості звуку в цій області, що навіть якісно не узгоджується з експериментом.

У **сьомому** розділі, виходячи з виразів для повної матриці густини, а також для дво-, три- та чотиричастинкового структурних факторів багатобозонної системи, знайдено температурну поведінку середніх значень кінетичної, потенціальної і повної внутрішньої енергії в наближенні “двох сум за хвильовим вектором”, яке враховує три- та чотиричастинкові кореляції. В границі як низьких, так і високих температур, отримані вирази відтворюють вже відомі результати. Для чисельного розрахунку початкова інформація про потенціал міжчастинкової взаємодії бралася з екстрапольованих до нуля температур експериментальних даних для структурного фактора і швидкості першого звуку в рідкому  ${}^4\text{He}$ . З їх допомогою вдалося ефективно визначити фур’є-компоненту потенціалу парної міжчастинкової взаємодії в рідкому  ${}^4\text{He}$ . Чисельний розрахунок проводився з визначеною в дисертації ефективною масою.

Відповідні висновки, зроблені в дисертації, є обґрунтованими і важливими для подальшого уточнення теорії рідкого гелію. Поряд з важливістю отриманих в дисертаційній роботі результатів необхідно зробити декілька суттєвих, на мій погляд, зауважень.

1. Отримання аналітичних виразів для середніх значень кінетичної, потенціальної і повної внутрішньої енергії багатобозонної системи, їх чисельний розрахунок та їх порівняння з експериментальними даними може говорити тільки про якісне співпадіння, далеке від повного в’яснення причин такої поведінки.
2. Можливо для покращення теоретичних результатів слід було врахувати розпад колективних збуджень при великих хвильових векторах і на цій підставі виявити умови ослаблення відповідних кореляцій, а значить і відповідний їх внесок.
3. Оскільки вирази для відповідних багаточастинкових кореляцій містять різні степені числа частинок, то напрошується питання про застосовність методу перевалу для визначення домінуючих вкладів у відповідні розрахунки. Це дало б можливість виділити саме ті кореляції, що дають найбільший внесок у статистичну суму. Вирішення перевальних рівнянь на порядок легше прямих розрахунків.
4. Завдання, яке ставилося в дисертації, полягало в знаходженні виразу для ефективної маси, який би усував інфрачервоні розбіжності та давав коректну поведінку в околі критичної точки. Але узгодження

при малих хвильових векторах не може одночасно враховувати можливості розпаду відповідних збуджень біля критичної точки.

Приведені зауваження не змінюють загального позитивного враження від дисертаційної роботи. Висновки роботи є обґрунтованими. Результати роботи своєчасно опубліковані в періодичних виданнях і відомі широкому загалу спеціалістів в даній галузі. Дисертація написана доброю і зрозумілою науковою мовою. Автореферат відповідає змісту дисертації. Сама дисертація „Мікроскопічна теорія бозе-рідини з урахуванням прямих три- і чотиричастинкових кореляцій”, подана на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 — теоретична фізика відповідає всім вимогам ВАК України, а її автор, Григорчак Орест Іванович, безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

Завідувач відділом синергетики  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М.М. Боголюбова НАН України,  
Доктор фізико-математичних наук,  
Професор, член - кореспондент НАН України

Б. І. Лев