

ВІДГУК

офиційного опонента на дисертаційну роботу Григорчака Ореста Івановича «Мікроскопічна теорія бозе-рідини з урахуванням прямих три- і чотиричастинкових кореляцій», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертація О.І. Григорчака присвячена важливій проблемі статистичної теорії багаточастинкових квантових систем. Предметом дослідження є термодинаміка рідкого ${}^4\text{He}$. Незважаючи на багаторічну історію досліджень у цій області, належного рівня мікроскопічного опису властивостей рідкого гелію у достатньо широкому інтервалі температур не вдається до цього часу досягнути. Складність цієї задачі пов'язана з відсутністю у моделі бозе-рідини малого параметра, а також, що важливо, з необхідністю врахування адекватним чином багаточастинкових кореляцій. Основні успіхи досягнуті поки що у рамках наближення хаотичних фаз (RPA), хоча бути спроби виходу за його межі, враховуючи непрямі три- і чотиричастинкові кореляції. Останніми роками спостерігається пожавлення у теорії бозе-систем, пов'язане з експериментальною реалізацією бозе- конденсації ультрахолодних атомів у пастках та оптичних гратках. Опис цього ефекту звернув увагу на необхідність удосконалення теоретичних підходів.

Сказане вище підтверджує актуальність дисертаційної роботи О.І. Григорчака, яка спрямована на побудову послідовної мікроскопічної теорії бозе-рідин у т.зв. пост-RPA наближенні з врахуванням, крім парних, прямих три- і чотиричастинкових кореляцій. Її метою, поряд з розвитком математичного апарату, є покращення кількісного опису основних термодинамічних і структурних характеристик.

Задачі, які розв'язані в дисертації, зводяться до наступного. Її основу складає отримання аналітичного виразу для повної матриці густини бозонної системи. Автор використовує відомий метод колективних змінних і розвиває схему розрахунків, яка враховує внески прямих три- і чотиричастинкових кореляцій (що відповідає т.зв. наближенню «двох сум за хвильовим вектором»). Це схема, яку стандартно використовують у теорії багатобозонних систем за відсутності у теорії малого параметра; її ефективність відома і підтверджена прямими числовими методами. Знайдений вираз для повної матриці густини дав можливість провести розрахунки структурних факторів та термодинамічних функцій шляхом обчислення якобіана переходу до колективних змінних та повної статистичної суми у відповідному до пост-RPA наближенні. Автором дисертації застосовано і розвинено процедуру розрахунку ефективної маси бозона ${}^4\text{He}$, спрямовану на подолання інфрачервоної розбіжності у чотиричастинковому структурному факторі. Проведено розрахунки дво-, три- і чотиричастинкових структурних факторів; застосовано при цьому оригінальний прийом,

коли кількісна інформація про вихідну взаємодію між бозе-атомами береться з експериментальних даних. Розраховано і досліджено температурну залежність швидкості першого звуку у широкому інтервалі температур (з урахуванням поправок, що містять одну суму за хвильовим вектором). На основі отриманих виразів для повної матриці густини і структурних факторів знайдено у пост-RPA середню потенціальну і кінетичну енергії системи бозонів, отримано їх температурні залежності прив'язуючись до експериментальних значень для структурного фактора і швидкості звуку в граници $T=0$.

Варто виділити окремо основні наукові результати дисертації О.І. Григорчака. До них можна віднести:

- В рамках методу колективних змінних вперше отримано аналітичні вирази для повної матриці густини системи взаємодіючих бозонів, а також статистичної суми такої системи, придатні у широкій області температур, Розвинено при цьому схему, яка дає можливість врахувати та оцінити внески прямих три- і чотиричастинкових кореляцій.
- Вперше, із застосуванням процедур функціонального інтегрування та розкладів за кумулянтами, побудовано якобіан переходу від вихідних декартових до колективних змінних у формі, що відповідає усередненню функції переходу Зубарєва за станами ідеальної бозе-системи. Слід зауважити, що виділення матриці густини ідеального бозе-газу з повної матриці густини (з подальшим розрахунком величин, що залишаються і мають зміст поправок в рамках схеми пост-RPA) є важливим кроком, який можна інтерпретувати як переход від вихідної бозе-системи до ідеального газу з перенормованою взаємодією (за рахунок процесів розсіяння).
- Важливим здобутком роботи є отримання коректного виразу для ефективної маси атома ${}^4\text{He}$, придатного в широкій області температур (як нижче, так і вище T_c , за винятком вузької флюктуаційної ділянки). В доповнення до мікроскопічного опису дисертантом застосовано феноменологічну схему; це дало можливість позбавитись інфрачервоної розбіжності у кореляторах за рахунок врахування багаточастинкових ефектів. В результаті отримано значення критичної температури λ -переходу T_c , близьке до експериментального, а також наблизити до спостережуваного на досліді хід кривої теплоємності рідкого ${}^4\text{He}$.
- До числа корисних результатів роботи можна віднести також отримання та розрахунки в пост-RPA наближенні дво-, три- і чотиричастинкових структурних факторів, швидкості першого звуку, середніх значень потенціальної та кінетичної енергії бозонної системи. Шляхом числових обчислень знайдено та проаналізовано їх температурні залежності у докритичній та закритичній областях. Показано, що врахування кореляційних внесків, що виникають у пост-RPA підході, впливає на температурний хід згаданих вище термодинамічних величин (особливо помітним є вплив на теплоємність, де поправки за рахунок три- і чотиричастинкових кореляцій визначають «правильну» залежність від температури в області вище T_c).

Перераховані вище результати є новими і мають, поза сумнівом, наукову цінність. Можна вважати, що вони успішно доповнюють і в певному сенсі завершують дослідження, розпочаті в роботах інших авторів і спрямовані на коректний вихід за

рамки RPA та повне врахування внесків, що мають вигляд «двох сум за хвильовим вектором», до матриці густини. Проведене в роботі дослідження має в першу чергу фундаментальний характер. Його можна трактувати як подальший розвиток методу колективних змінних у плані його застосування до конкретних задач, спрямованих на опис термодинаміки та просторових кореляцій у взаємодіючих бозе-системах.

Окремо варто відзначити високий математичний рівень роботи. Дисертант успішно використовує такі потужні і сучасні методи як кумулянтні розлади та функціональне інтегрування, демонструє здатність виконувати складні як аналітичні так і числові розрахунки. Спосіб подання матеріалу свідчить про його належну математичну культуру. Отримані результати апробуються шляхом порівняння з відомими з літератури граничними випадками (високих та низьких температур), а також з даними експерименту.

Говорячи про високий науковий рівень дисертації, слід разом з тим відзначити її певні недоліки.

1. Дисертаційна робота О.І. Григорчака є безпосереднім продовженням попередніх досліджень у вибраній галузі – робіт І.О. Вакарчука, Р.О. Притули, В.С.Пастухова та ін. Автор використовує і розвиває в них методи і підходи та отримані результати, формулюючи і розв'язуючи своє завдання – послідовне врахування прямих три – і чотиричастинкових кореляцій. Не завжди, однак, чітко виділене те, що внесене та розвинене і доповнене самим дисертантом. Це стосується, зокрема, отримання температурно залежного якобіана переходу, чи способу розрахунку ефективної маси атома гелію при ненульових температурах.
2. Є зауваження до графічного матеріалу дисертації. Автор наводить розраховані криві для структурного фактора як функції хвильового вектора (при різних температурах), а також ефективної маси атома ${}^4\text{He}$, швидкості первого звуку та середньої енергії в залежності від температури, подаючи, поруч з експериментальними, результати, отримані у різних наближеннях теорії. Не проведено, однак, більш детального обговорення таких графіків, бракує висновків, які вказували б на можливі причини тих чи інших розбіжностей. Особливо важливим це було б у випадках ефективної маси та повної середньої енергії.
3. На нашу думку, результати числових розрахунків, які стосуються термодинаміки та структурних характеристик, замало порівнюються в роботі з даними, отриманими в літературі з застосуванням інших аналітичних підходів, а також за допомогою методу Монте-Карло.

Висловлені зауваження не впливають на високу оцінку дисертаційної роботи О.І. Григорчака. Вона є завершеним аналітичним дослідженням, присвяченим вивченю кореляційних ефектів у багатобозонній системі, утвореній атомами ${}^4\text{He}$. Отримані основні результати є новими, мають фундаментальний характер і можуть сприяти більш глибокому розумінню ролі багаточастинкових кореляцій і вибору способів їх адекватного опису у таких системах за межами наближення хаотичних фаз (RPA).

Результати дисертації висвітлені у наукових публікаціях в журналах за її профілем, що входять у Перелік наукових фахових видань України. Автореферат роботи повністю відповідає її змісту. Робота оформлена на належному рівні; до мови і стилістики викладу зауважень немає.

Вважаю, що за науковим рівнем і значимістю основних результатів дисертація О.І. Григорчака задовільняє усі вимоги Порядку присудження наукових ступенів, що ставляється до кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика», а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

Офіційний опонент
головний науковий співробітник
Інституту фізики конденсованих
систем НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, професор

I.B. Стасюк

Підпис I.B. Стасюка засвідчує:
Вчений секретар,
кандидат фіз.-мат. наук



P.C. Мельник