

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Папочко Галини Іванівни «Домішкові стани багатобозонної системи на прикладі ізотопів гелію», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Дослідження фізичних властивостей та квантових ефектів у багаточастинкових бозе-системах залишається предметом уваги вчених в галузі теоретичної фізики протягом багатьох років. Починаючи з піонерських робіт М.М. Боголюбова в 40-50-х років минулого століття, значні зусилля були спрямовані на вивчення як механізму явища бозе-конденсації, так і особливостей у поведінці таких систем, що зумовлені присутністю бозе-конденсату. Активність у цій області значно зросла останнім часом у зв'язку із створенням експериментальних умов для спостереження бозе-конденсації у системах ультрахолодних бозе-атомів у пастках та, зокрема, у оптичних ґратках. Особливі ефекти тут виникають при внесенні фермі-атомів (як домішок, або ж як звичайної компоненти). У таких атомних сумішах можна ставити питання про вплив фермі-домішок на бозе-конденсацію, або ж про їх поведінку та зміни у їхньому енергетичному спектрі під впливом базової бозе-системи. Такі проблеми є в полі зору дослідників. У цьому плані тема дисертаційної роботи Г.І. Папочко, де предметом дослідження є властивості домішкового спектру багатобозонної системи з малою концентрацією фермі-домішок, є безумовно актуальною. Основна увага в роботі звернена на проблему домішкового полярона, утвореного бозонним оточенням у сильно неідеальній системі типу рідкого гелію-4, а також на спосіб опису та роль багаточастинкових кореляцій. Метою роботи складає вивчення впливу бозонного середовища на поведінку домішкових атомів (їх енергетичний спектр, ефективну масу) та побудова самоузгоджених схем розрахунку мікроскопічних характеристик системи.

Дисертація Г.І. Папочко складається з вступу, п'яти розділів (з них один оглядовий, чотири містять оригінальні результати, отримані дисертантом), висновків, списку використаних джерел та додатків. За отриманими результатами опубліковано в 6 статтях (з них 5 – у виданнях, що індексуються в Scopus) та 17 тезах доповідей на конференціях.

Другий розділ дисертації (який є першим з оригінальних) присвячено дослідженню енергетичного спектру бозе-полярона (домішкового атома плюс бозе-оточення) у розрідженому бозе-газі при короткосяжній бозон-домішкковій взаємодії та аналізу особливостей поведінки у випадках відштовхувальної та притягальної взаємодії. Така модель має безпосереднє відношення до ситуації, яка була реалізована недавно на експерименті, коли за допомогою резонансу Фейнбаха змінюють як величину, так навіть і знак бозон-домішкової взаємодії (домішки  $^{39}\text{K}$ ,  $^{41}\text{K}$  в  $^{87}\text{Rb}$  конденсаті).

Застосований підхід ґрунтується на наближенні Боголюбова для взаємодії між бозонами та врахуванні процесів розсіяння домішкового атома на боголюбівських квазічастинках. За допомогою теорії збурень Релєя-Шредінґера розраховано зміну енергії домішки  $\Delta\varepsilon_q$  у випадках бозон-домішкового відштовхування або притягання (з врахуванням у другому з них ефекту самолокалізації) та параметр загасання спектру  $\Gamma_q$ . Проаналізовано умови, за яких загасання зникає: досліджено ефект самолокалізації. Розгляд цих питань продовжено більш детально в рамках теорії Бриллюєна-Вінґера. Розраховано,

крім цього, обернену ефективну масу  $M/M^*$  домішки як для відштовхування, так і притягання; отримані результати відповідають відомим з літератури у Т-математичному наближенні.

Розрахунки енергетичних характеристик домішкових атомів продовжено у розділі 3 для випадку сильно скорельованої бозе-системи на прикладі домішки  $^3\text{He}$ , зануреної у рідкий гелій-4. Задача розв'язується варіаційним методом з пробною хвильовою функцією, у якій експоненційний фактор  $\exp\{U(\vec{r})\}$  стосується домішки у бозе-рідині. Для опису бозонів використано представлення колективних змінних; відповідну частину пробної хвильової функції взято у гаусовому наближенні. Проведено розрахунок т.зв. енергії розділення  $B$  та ефективної зміни об'єму  $\alpha$  при внесенні домішки. Для випадку  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  отримано значення  $B=2,02\text{K}$  (при густині  $\rho = 0,0218(\text{Å})^{-3}$ ) та  $\alpha = 0,50$ . Хоча є помітною розбіжність з даними експерименту ( $B_{\text{exp}}=276\text{ K}$  та  $\alpha = 0,284$ ), застосування прямої варіаційної схеми тут виявилось успішним, незважаючи на вельми простий абзац. Причина тут, перш за все, у нехтуванні при формуванні пробної хвильової функції прямими три- і чотиричастинковими кореляціями, неврахуванням при цьому руху домішкового атома, спрощеним моделюванням бозон-домішкової взаємодії. В цьому ж розділі шляхом розрахунку одностинкової матриці густини отриманої в рамках варіаційного підходу, обчислено імовірність знайти домішковий атом у стані з ненульовим та нульовим імпульсом. У граничному випадку великих відстаней теорія добре відтворює відомий результат для відносної кількості бозе-конденсату в рідкому  $^4\text{He}$ , що є своєрідною апробацією запропонованого підходу.

Четвертий розділ дисертації має особливий характер. У ньому представлено результати, які дисертант отримала у припущенні, що розгляд нелінійних флуктуацій густини (три і чотиричастинкових ангармонізмів) у бозе-рідині можна провести у представленні колективних змінних за допомогою моделі з осциляторами, які описуються деформованою алгеброю комутаційних співвідношень. Модифікується, зокрема, комутатор узагальнених координат і імпульсів шляхом внесення додаткового члена другого порядку за координатами, що містить параметр деформації  $\beta_k$ . Для сукупності таких осциляторів розв'язано рівняння Шредінгера. Знайдено енергію елементарних збуджень, яка за від'ємних значень  $\beta_k$  краще відтворює експериментально спостережуваний спектр рідкого  $^4\text{He}$ , ніж спектр у наближенні Боголюбова. Враховуючи цей та інші критерії, обрано конкретний вигляд  $\beta_k$  у записі через структурний фактор  $S(k)$ . Обчислено поправки до кінетичної енергії, розподілу за імпульсами та потенціалу міжбозонної взаємодії для системи з деформацією комутаційних співвідношень. При обмеженні переходами до першого збудженого стану знайдено внески до енергії основного стану системи «бозе-рідина плюс домішка», що дало змогу розрахувати енергію розділення домішкового атома у бозе-рідину та ефективну масу домішки, використовуючи модельний параметр деформації. Отримано непогане узгодження для  $M^*$  з даними експерименту у порівнянні з недеформованим випадком та у області більших (ніж за рівноважних умов) густин. Відзначено тим самим суттєву роль бататозонних кореляцій.

У останньому п'ятому розділі роботи продовжено розгляд задачі про бозе-полярон за допомогою традиційного методу теорії багаточастинкових систем у його квантово-польовому формулюванні. Розглядаються спин-поляризовані фермі-домішки; основна увага зосереджена на розрахунку домішкової одностинкової мацубарівської функції Гріна, яка записана на мові грасманових змінних у представленні континуальних інтегралів. При записі дії для бозонного поля враховано, крім боголюбівського наближення, найпростіші

тригустинні процеси розсіяння, а взаємодію з ферміонами пов'язано з взаємним впливом коливань густини. При розрахунках використано діаграмний метод. Власноенергетичну частину домішкової функції Гріна знайдено у двох наближеннях: у першому з них вершинна частина взята в нульовому наближенні, а в другому – враховано поправки до неї другого порядку, сформовані найпростішими діаграмами. При цьому знехтувано уявною частиною у спектрі, а замість повного само узгодження при розрахунку внесків скелетних діаграм застосовано схему послідовних наближень, зупиняючись на першому кроці. Числові результати для ефективної маси домішки та її енергії запурення отримано у припущенні про рівність міжбозонних та бозон- домішкових потенціалів взаємодії (що придатне для домішки  $^3\text{He}$  в рідині  $^4\text{He}$ ). Отримане у другому наближенні значення ефективної маси  $M^*/M$  для  $^3\text{He} = 2,13$  добре узгоджується з експериментальними даними та результатами розрахунків Монте-Карло ( $M^*/M$  від 2,03 до 2,20).

Спільною рисою досліджень, результати яких подано в 2-5 розділах дисертації, є спрямованість на розгляд тої самої проблеми – особливостей та характеристик енергетичного спектру домішкового атома у багаточастинковій бозе-системі. Використано різні методи досліджень, маючи на увазі розрідженій бозе-газ чи сильноскорельовану бозе-рідину. Застосовано як традиційні, так і недавно розвинуті (теорія збурень, представлення колективних змінних, моделі з деформованою алгеброю, функції Гріна та діаграмна техніка). Їх застосовність не викликає сумнівів, вони апробовані на багатьох задачах квантової теорії багаточастинкових систем.

Виходячи із застосованих методів, обґрунтованості використаних моделей та рівня і точності проведених розрахунків, можна стверджувати про достовірність отриманих результатів. Це також підтверджує добре узгодження числових оцінок, проведених у роботі, з даними як експерименту, так і розрахунків за допомогою сучасних методів моделювання типу методу Монте-Карло.

До найбільш важливих результатів роботи, які визначають її повизну можна віднести наступні.

Вперше в рамках теорії збурень досліджено основні риси енергетичного спектру (такі як параметр загасання та ефективна маса) домішкового атома, що рухається в сильно розрідженому бозе-газі у випадках притягальної або відштовхувальної бозон-домішкової взаємодії; встановлено межі застосовності такого підходу.

В рамках варіаційного методу отримано енергію основного стану системи «бозе-рідина плюс домішка вий атом» з врахуванням внеску непрямих кореляцій та знайдено повний структурний фактор для такої системи на прикладі домішки  $^3\text{He}$ , зануреної в гелій - 4; вперше обчислено енергію домішкового атома для різних густин середовища.

Вперше запропоновано спосіб врахування нелінійних флуктуацій густини атомів бозе-рідини шляхом використання ефективної осциляторної моделі з деформованими комутаційними співвідношеннями для колективних координат; розраховано на цій основі енергію і ефективну масу домішки та досліджено вплив на характеристики спектру багатобозонних кореляцій.

При дослідженні властивостей бозе-полярона за допомогою методу функцій Гріна в рамках функціонального представлення через інтеграл за траєкторіями, вперше проведено розрахунок ефективної маси домішкового атома на основі процедури послідовних наближень при розв'язанні рівняння для вершинної частини функції Гріна домішки у зображенні через скелетні діаграми. Отримано результати, які близькі до експериментальних значень ефективної маси у випадку  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  та до даних, отриманих методом Монте-Карло.

Слід підкреслити безперечну наукову цінність дисертації. У ній розглянуто проблеми, які на даний час є в полі зору дослідників. Дисертант демонструє своє бачення цих задач, запропонувала нові підходи і досягла результатів, у окремих випадках, які є на рівні повітряних досягнень експерименту та числового моделювання.

Практичну цінність дисертаційної роботи Г.І. Паночко визнають продемонстровані можливості використаних методів дослідження домішкових станів та характеристик спектру, як також і самого поляроного ефекту. Їх можна застосувати і для дослідження домішкових явищ в ультрахолодних газах у штучно створених потенціальних пастках. Розвинені підходи можна також перенести на вивчення аналогічних явищ у бозон-ферміонних атомних сумішах у оптичних ґратках, у тому числі на дослідження локальних станів фермі-домішки у бозе-середовищі у таких системах (як у присутності, так і при відсутності бозе-конденсату). Числові оцінки енергій занурення чи розділення та ефективної маси, виконані в роботі, можуть бути корисними для подальших експериментальних досліджень та їх інтерпретації.

Разом з тим, до дисертації можна висловити наступні зауваження.

1. З тексту роботи практично не видно, яка роль у поведінці домішкового атома (в т.ч. у його енергії та ефективній масі) належить бозе-конденсату. Концентрація (відносна кількість) бозе-частинок з нульовим імпульсом явно не входить в отримані вирази. Зокрема, це стосується другого розділу, де оператор взаємодії домішки з бозе-середовищем враховує процеси розсіяння у наближенні Боголюбова за участю елементарних збуджень, оператори яких пов'язані лінійно з операторами народження і знищення бозонів з ненульовим імпульсом. Оскільки у формулі (2.4) для оператора згаданої вище взаємодії замість концентрації конденсату фігурує загальна концентрація бозонів, виникає запитання про вплив такого наближення на оцінку ролі бозе-конденсату.
2. Окремі розділи роботи – це окремі розв'язані задачі. Їх об'єднує спільна кінцева мета – розрахунки характеристик енергетичного спектру домішкового атома, що взаємодіє з бозе-оточенням. Отримано результати (за винятком, можливо 2-го розділу, де є своя специфіка згаданої взаємодії) мали б доповнювати один одного, виходячи з моделей і наближень та при застосуванні різних методів. Порівняння та обговорення того, що зроблено і отримано, є на мою думку, неповним. Загально сформульовані висновки до окремих розділів такої функції не виконують.
3. Хотілося б бачити обґрунтування апроксимації потрібного структурного фактора  $S(k_1, k_2, k_3)$  у вигляді добутку трьох парних (стор. 71) при розрахунку у третьому розділі енергії занурення домішки  $^3\text{He}$  в гелії 4.
4. Потрібно було б більш чітко описати застосовану процедуру підсумування за манубарівськими бозонними частотами (у вигляді простої зміни суми на інтеграл, стор. 115) при розрахунку власноенергетичної частини функції Гріна домішкового атома.
5. Зустрічаються нечіткі, а місцями і не точні, формулювання, які можуть викликати непорозуміння. Зокрема:
  - «... домішка, що рухається у сильно розрідженому бозе-конденсаті...» - це наводить на думку, що ніби бозе-частинки з ненульовими імпульсами відсутні (стор. 122 дисертації, стор. 15 автореферату);
  - «... якби ми описували взаємодію між атомами гелію сферичносиметричними потенціалами...» - як натік, що в дисертації такі потенціали не мають сферичної симетрії – але це не так, фур'є-образ  $v(k)$  залежить від модуля хвильового вектора (стор. 101).
  - «... бозонна вершинна частина погано міряється...» (стор. 117) – жаргонний вислів.

Вказані недоліки ніяким чином не впливають на загальну оцінку дисертаційної роботи Г.І. Паночко. Основні положення та висновки дисертації достатнім чином обґрунтовані. Отримані результати сприяють кращому розумінню різних явищ і процесів, що відбуваються у атомних бозе-системах (таких, зокрема, як гелій  $-4$ ) при внесенні до них домішкових атомів, та відкривають нові перспективи у їх дослідженні. Робота має цілісний характер і виконана на сучасному науковому рівні; коло розв'язаних задач відповідає стану досліджень у вибраній дисертантом галузі.

Основні результати роботи опубліковані в шести статтях в журналах, що входять в «Перелік наукових фахових видань України», в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», та апробовані на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях; автореферат дисертації повністю відображає її зміст. В цілому, дисертаційна робота Г.І. Паночко відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого Кабміном України.

За повнотою досліджень та їх науковою значимістю дисертація задовільняє усі вимоги, що ставляться до кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика, і її автор Галина Іванівна Паночко заслуговує присудження їй 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

І.В. Стасюк

Підпис І.В. Стасюка засвідчую:

Вчений секретар,  
кандидат фіз.-мат. наук



Р.С. Мельник