

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертацію **Карини Олександрівни Ісаєвої**

«Стійкі когерентні структури в атомарних Бозе-конденсатах»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Новий етап у дослідженнях поведінки багаточастинкових Бозе-систем розпочався в кінці двадцятого століття з появою надхолодних (десятки нанокельвінів) атомних газів. Якщо раніше експерименти стосувалися в основному рідкого гелію-4, то тепер з'явилося величезне різноманіття багатобозонних систем (з різним спіном бозонів, суміші і т.д.), у яких експериментатори спостерігають конденсацію Бозе-Айнштейна, надплинність і т.д. Ці нові експериментальні можливості потребують розвитку відповідної теорії для пояснення спостережуваної поведінки і стимулювання постановки нових експериментів.

Для опису Бозе-конденсату газу надхолодних атомів звичайно використовують середньопольовий формалізм Гроса-Пітаєвського. У кожному конкретному випадку це можуть бути досить складні нелінійні диференційні рівняння, які враховують геометрію пастки, що утримує надхолодний атомний газ, міжбозонні взаємодії (зокрема, для спінорного Бозе-конденсату), доповнені описом ефектів дисипації і температурних ефектів. Відомо, що нелінійні системи передбачають існування солітонів та інших складніших просторових когерентних структур. Дисертаційна робота Карини Олександрівни Ісаєвої підсумовує результати кількарічного теоретичного дослідження динаміки когерентних структур у кількох атомарних Бозе-конденсатах на основі аналітичного і числового аналізу нелінійних диференційних рівнянь типу Гроса-Пітаєвського.

Низка нових результатів викладена у першому оригінальному розділі дисертації (розділ 2); цей матеріал опубліковано у статті у *Physical Review A* **85**, 053640 (2012). Тут розглянуто бінарну суміш (може бути і один сорт Бозе-атомів, але з ненульовим спіном; тоді компоненти – атоми у різних спінових станах) конденсатів Бозе-Айнштейна у двовимірній (дископодібній) геометрії; при цьому між атомами одного сорту є притягальна взаємодія, а між атомами різних сортів – або притягання, або відштовхування. Питання, на яке шукається відповідь: чи будуть стійкими розв'язки системи рівнянь Гроса-Пітаєвського у вигляді пари “солітон для першої компоненти і солітон для другої компоненти” (векторний солітон)? Показано, що для притягальної міжкомпонентної взаємодії векторний солітон є стійким. Для відштовхувальної взаємодії за певних умов (приведених у дисертації, див., наприклад, рис. 1 у авторефераті) теж існують стійкі солітон-солітонні пари, зокрема, такі, коли одна компонента формує кільце, а інша – є у центрі кільця (розв'язок з відокремленими фазами). Результати здобуті шляхом дослідження стаціонарних розв'язків, варіаційного і лінійного аналізу стійкості, а також прямими числовими експериментами. Це теоретичне дослідження 2012 року є пропозицією для експериментальної перевірки; природне

питання, яке тут виникає, чи досліджені векторні солітони вже спостерігалися у реальних експериментах?

Другий оригінальний розділ (розділ 3, ґрунтується на матеріалі статей Physical Review A **88**, 051602(R) (2013) і Low Temperature Physics **39**, 724 (2013)) присвячений аналізу стійкості надплинного потоку в спінорному конденсаті у тороїдній пастці. Це дослідження мотивоване експериментами над атомами ^{87}Rb у двох різних спінових станах у тороїдній пастці (S.Beattie et al. Phys. Rev. Lett. **110**, 025301 (2013)). Для пояснення спостережень використана середньопольова модель Гросса-Пітаєвського для спінорного (спін-1) конденсату з феноменологічним параметром дисипації. Параметри моделі припасовані до згаданого експерименту. Числовий аналіз динаміки заданого початкового стану $(\psi_+, \psi_0, 0)|_{t=0}$ (аж до 180 секунд) показав, як змінюється кутовий момент конденсату (на одну частинку), див., наприклад, рис. 2 у авторефераті. В залежності від різниці у заселеності спінових компонент $(N_+ - N_0)/(N_+ + N_0)$ спостерігаються різні сценарії еволюції. Досліджено також випадок конденсату з ненульовими спіновими проєкціями ± 1 . Проведений аналіз виявляє мікроскопічні механізми руйнування надплинного потоку. В цілому розроблена теорія є у якісній згоді з експериментом Біті та ін. (2013).

Третій оригінальний розділ (розділ 4, опубліковано в Physical Review A **91**, 023607 (2015)) стосується конденсату у тороїдній пастці, в якому є перемішування; ця теоретична розробка мотивована експериментами над атомами ^{23}Na ; див. K.C.Wright et al. Phys. Rev. A **88**, 063633 (2013). Перемішування здійснює рухомий пучок, що має відштовхувальний характер взаємодії з атомами; його треба додати до незалежного від часу потенціалу тороїдної пастки. Рівняння Гросса-Пітаєвського також має містити феноменологічний параметр дисипації. Аналіз дисипативної динаміки конденсату з перемішуванням показав, що існує два режими еволюції Бозе-конденсату: для малих і для великих кутових частот перемішування. Наприклад, при малих швидкостях перемішування спостерігається поява пари вихор-антивихор, яка далі розпадається; антивихор рухається до зовнішньої границі і розпадається на елементарні збудження, а вихор закріплюється у центральній частині. Підсумовано дослідження вихрових збуджень у конденсаті у тороїдній пастці з перемішуванням на рис. 4 автореферату, де показано кінцевий результат перемішування тривалістю 1 секунда: момент імпульсу в залежності від кутової частоти перемішування і амплітуди потенціалу перемішування. Теоретичні результати є у якісній згоді з вищезгаданим експериментом Райта та ін.

У четвертому оригінальному розділі (розділ 5, містить матеріал статті Physical Review A **94**, 063642 (2016)) досліджено вплив теплового шуму на проковзування фази (на зміну кутового моменту на частинку) в конденсаті у тороїдній пастці з перемішуванням. Енергія конденсату як функція моменту імпульсу (на частинку) має локальні мінімуми при $l=0,1,\dots$. Конденсат може тунелювати між ними (проковзування фази). Крім того, температурні флуктуації (які моделюються як випадковий Гаусів шум у правій стороні рівняння Гросса-Пітаєвського) можуть додатково впливати на перехід між станами конденсату з різними l . У дисертації для стохастичного рівняння Гросса-Пітаєвського побудовано відповідне рівняння Фокера-Планка і оцінено час переходу та ймовірність проковзування

фази. Знайдений результат для граничної частоти перемішування $\Omega_c/(2\pi)$, коли стається проковзування фази, коло 2.2 Гц трохи більший за експериментальне значення (коло 1 Гц), але перехід від детерміністичної до стохастичної моделі дещо наблизив теорію до експерименту. В дисертації обговорено як покращити модель.

Результати, представлені у дисертації, отримані кількома незалежними доповняльними методами: варіаційний аналіз стаціонарних розв'язків, лінійний аналіз Боголюбова-де Жена, числові методи для стаціонарних крайових задач і для інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних з розщепленням кроку. Ці математичні техніки добре описані у вступному розділі дисертації (розділ 1). Крім того, вступний розділ містить огляд фізичних теорій конденсації Бозе-Айнштейна, надплинності, способів отримання Бозе-кондесату атомарних газів, формалізму Гросса-Пітаєвського, відомості про спінорні Бозе-кондесати та врахування дисипативних ефектів. Ця добре написана оглядова частина дисертації може бути корисна для досить широкого кола читачів. Принагідно відзначу, що К.О. Ісаєва є співавторкою двох оглядових статей (Low Temperature Physics 39, 724 (2013); Romanian Reports in Physics 67, 249 (2015)), які входять у список опублікованих праць за темою дисертації.

При читанні дисертації у мене виникли питання; на які я просив би відповісти авторку під час захисту дисертації. Вони стосуються способу врахування температурних флуктуацій. У дисертації – це заміна детерміністичного рівняння Гросса-Пітаєвського на стохастичне з випадковим Гаусовим шумом, силу якого контролює параметр $\eta_0 \geq 0$. Розв'язок рівняння Фокера-Планка для незалежного від часу гамільтоніана дає розподіл Гібса з “температурою” $T = \eta_0 / \gamma$, де γ – параметр дисипації. Зрозуміло, що це дуже проста модель врахування температурних ефектів. Чому автори вважають її застосовною для пояснення експериментів, розглянутих у розділі 5? Які обмеження такого опису і коли він втрачає зміст? Чи грають якусь роль кореляційні властивості шуму? Далі, не дивно, що у формулу для температури T входить параметр дисипації γ – дисипація зумовлена і температурою. А тому навіть детерміністичне рівняння Гросса-Пітаєвського з дисипацією містить якісь температурні ефекти, але не всі. Що з температурних ефектів враховує γ , а що можна врахувати лише запровадивши шум?

Відзначу також недоліки у оформленні дисертації і автореферату. Дисертацію і автореферат можна було б краще вичитати і усунути описки та мовні огріхи. Наприклад, автореферат, с.5: абзац “Були визначені ... конденсатах.” з’являється двічі; на рис. 4 не показано залежність числа вихорів та антивихорів від Ω і U_b , хоча у підписі сказано, що ці величини є на цьому рисунку; с.13: нема номерів статей 1, 2, 4; є неточності і у списку використаних джерел у дисертації.

Характеризуючи роботу в цілому, наголошу, що у дисертації розв'язано кілька актуальних теоретичних задач, які тісно пов'язані з експериментами і пояснюють недавні експериментальні спосереження. Крім цього, розроблена математика застосовна до ширшого кола задач нелінійної фізики (де використовують, наприклад, двовимірне нелінійне рівняння Шредингера), що теж свідчить про практичну цінність дисертації. Дисертаційна робота має перспективи застосування, подальшого

розвитку та узагальнень. Результати дисертації опубліковані у престижних міжнародних журналах і доступні науковій спільноті. Вони були представлені на кількох міжнародних конференціях у Києві та Трієсті (Італія). Автореферат дисертації правильно і повно відображає зміст самої дисертації.

У підсумку, вважаю, що дисертація К.О. Ісаєвої «Стійкі когерентні структури в атомарних Бозе-конденсатах» цілком відповідає всім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженим постановою КМ України від 24 липня 2013 р. №567, щодо кандидатських дисертацій, а її авторка Карина Олександрівна Ісаєва, без сумніву, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

завідувач відділу квантової статистики

Інституту фізики конденсованих систем НАН України,

доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник

О.В. Держко

ПІДПИС О.В. ДЕРЖКА СВІДЧУ

Вчений секретар

Інституту фізики конденсованих систем НАН України,

кандидат фізико-математичних наук

26 грудня 2017 р.



Р.С. Мельник