Рецензія

на дисертаційну роботу

Собко Богдани Юріївни

«Термодинамічні функції системи із дробовими статистиками»

подану на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 «Природничі науки»

за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність теми дисертації

Спрощений опис складних багаточастинкових систем за допомогою концепції (переважно) невзаємодіючих квазічастинок є основою нашого розуміння фізики конденсованого стану. Статистика цих квазічастинок в "стандартних" макроскопічних квантових системах, як тверді тіла, квантові рідини, магнетики переважно є бозонною або ферміонною. Проте вже з кінця 70 років минулого століття стало зрозуміло, що в двовимірі межа між бозонами і ферміонами змазується, і, взагалі кажучи, при перестановці двох тотожніх частинок на площині їх хвильова функція змінюється на довільну фазу (з легкої руки Ф. Вільчека ці частинки названі еніонами). Незважаючи на те, що еніони не присутні в Стандартній моделі вони давно вже вийшли за рамки суто теоретичного концепту і використовуються для опису дробового квантового ефекту Холла, деяких моделей магнетизму та інших систем, які активно вивчаються теоретично і експериментально в останні десятиліття. Тому дисертаційна робота Богдани Собко, яка спрямована на дослідження еніонів з магнітним зарядом та застосування концепції невзаємодіючих квазічастинок з нестандартними статистиками для ефективного моделювання реальних систем зі статистичною чи міжчастинковою взаємодіями, є актуальною.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука Львівського національного університету імені Івана Франка згідно держбюджетних тем: ФФ-30Ф «Класичні і квантові системи з нестандартними комутаційними співвідношеннями і статистиками» (2016-2018 р., номер д/р 0116U001539); ФФ-83Ф «Квантові ефекти у фізиці одно- і багаточастинкових систем у просторах зі складною структурою» (2019 р., номер д/р 0119U002203); ФФ-31Ф «Роль кількачастинкових ефектів у формуванні властивостей макроскопічних систем в обмежених геометріях» (2022 р., номер д/р 0122U001514). Частина досліджень також виконувалась у межах проєкту Ф64/37-2016 від ДФФД України «Класичні та квантові системи за межами стандартних підходів: електродинаміка у просторах вищої вимірності» (2016 р., номер д/р 0116U005055).

Наукова новизна
Дисертація Богдани Собко містить велике число результатів, які були отримані вперше. Зокрема,
— розглянуто задачу про поведінку магніто заряджених еніонів у магнітному полі, та розраховано поправки до другого віріального коефіцієнта та магнітну сприйнятливість, як функції еніонного параметра;
— запропоновано дві неадитивні модифікації фермі-газу за допомогою q-експоненти Цалліса, та досліджено термодинамічні властивості таких систем;
— здійснено ефективне моделювання декількох багаточастинкових систем (так званих, неабелевих еніонів з твердою та м'якою серцевинами, двовимірного фермі-газу з контактною взаємодією) через двопараметричні дробові статистики.

Практична цінність роботи
Незважаючи на те, що робота має фундаментальний характер, результати потенційно можуть бути використані для ефективного опису конденсованих систем в сильних магнітних полях (наприклад, дробовий ефект Холла), систем з далекодійними силами між частинками та ін. Крім того, методи розвинені в дисертації можна використовувати для подальшого дослідження багатоеніонних систем, і систем макроскопічного числа взаємодіючих між собою частинок із стандартними статистиками.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій
Наукові положення дисертації обґрунтовано в тексті роботи та коректно відображено у висновках. Нові результати, отримані здобувачкою, відповідають меті та завданням роботи і повною мірою висвітлені в опублікованих працях. Вірогідність результатів підтверджується і рівнем журналів, де опубліковані статті роботи, і фактом їх обговорення на конференціях і семінарах за участю фахівців. В роботі використані добре апробовані методи, що забезпечує достовірність отриманих результатів.

Характеристика основних положень роботи
Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел (137 позицій).

У **вступному** розділі обґрунтовано вибір теми дослідження, чітко сформульовано мету та і завдання, вказано на наукову новизну і наголошено на практичному значенні отриманих результатів. В цьому ж розділі дізнаємось про апробацію результатів і про особистий внесок авторки.

Перший розділ присвячено історії виникнення науки про еніони та сучасному стану галузі досліджень. Активізації досліджень останніх років, зокрема, завдячуємо експериментальному виявленню частинок з дробовою статистикою в системах двовимірних електронів у сильних магнітних полях та появі еніонних збуджень в спектрах (переважно граткових) модельних гамільтоніанів. Коротко, але достатньо повно в цьому розділі оглянуто проблему магнітних зарядів; значна увага приділяється системам з

неадитивними модифікаціями статистик та історії теоретичних досліджень неабелевих еніонів.

У **другому** розділі дисертаційної роботи розглянуто задачу про поведінку двох еніонів з магнітними зарядами. Вважаючи внески магнітних зарядів малими, розраховано, за допомогою квантомеханічної теорії збурень, поправки до рівнів двох еніонів, як функції параметра статистики. Детально встановлено межі застосовності отриманих результатів та обчислено другий віріальний коефіцієнт. Чисельно проаналізовано високотемпературні термодинамічні властивості магнітозаряджених еніонів, зокрема, магнітну сприйнятливість системи.

Третій розділ дисертації — є другим оригінальним і зосереджений на розв'язку задачі про поведінку ферміонів з модифікованим (q-експонентою Цалліса) розподілом. Увагу зосереджено на двох прикладах модифікації і доволі загальній степеневій поведінці густини станів. Детальний чисельний розрахунок у всій області температур і аналітичні розклади у низько- та високотемпературній границях дають чітке розділення властивостей двох моделей. Виявлено, що модель 1 якісно близька до ідеального фермі-газу, в той час, як низькотемпературна поведінка моделі 2 суттєво відрізняється: спостерігається лінійна, а не квадратична залежність термодинамічних функцій від температури, що призводить до «залишкової» теплоємності при T=0.

У **четвертому** розділі здійснено цікаву спробу ефективного опису багаточастинкових систем із статистичною чи міжчастинковою взаємодіями за допомогою системи невзаємодіючих (квазі)частинок з модифікованими розподілами. Як приклад, вибрано випадок двопараметричних дробових статистик, параметри яких знаходились порівнянням других віріальних коефіцієнтів реальних систем неабелевих еніонів та слабко неідеального фермі-газу з контактною взаємодією.

Загальні **висновки** підсумовують результати дисертаційної роботи.

Повнота викладу матеріалів у роботах, які опубліковані авторкою

Всі результати, які представлені Богданою Собко в дисертації, повною мірою висвітленні в опублікованих 11 працях — у 6 журнальних статтях (4 з яких включено до міжнародних наукометричних баз), та 5 тезах доповідей на конференціях.

Зважаючи на рівень і кількість публікацій та ступінь виконання поставлених в меті роботи задач, можна стверджувати, що дисертаційна робота є завершеним дослідженням з важливим науковим значенням.

Зауваження до змісту та оформлення дисертації

При уважному прочитанні дисертації суттєвих зауважень до змісту і наповнення не виявлено. Проте, при оформленні дисертаційної роботи вартувало перенести більш технічні нюанси як аналітичних, так і чисельних розрахунків у додатки.

Зрозуміло, що висловлене зауваження ніяк не впливає на позитивне враження від роботи і цінність отриманих результатів і зроблених висновків.

Дані про відсутність текстових запозичень та порушення академічної доброчесності

При детальному розгляді дисертації Богдани Собко порушень академічної доброчесності не виявлено.

Висновок

Дисертація «Термодинамічні функції систем із дробовими статистиками» подана Б. Собко на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 — «Природничі науки» за спеціальністю 104 — «Фізика та астрономія» є завершеним дослідженням, яке за актуальністю, новизною, практичним значенням та обсягом результатів відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року, а її авторка, Богдана Юріївна Собко, заслуговує присудження їй ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

доцент кафедри теоретичної фізики
імені професора Івана Вакарчука
Львівського національного університету
імені Івана Франка,
кандидат фізико-математичних наук В. С. Пастухов