Голові спеціалізованої
вченої ради ДФ 35.051.090
Львівського національного
університету імені Івана Франка
доктору фізико-математичних наук,
професору Вавруху Маркіяну Васильовичу

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача кафедри прикладної математики Інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка», Марковича Богдана Михайловича на дисертаційну роботу Собко Богдани Юріївни «Термодинамічні функції систем із дробовими статистиками», подану до захисту у спеціалізовану вчену раду ДФ 35.051.090 Львівського національного університету імені Івана Франка на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (галузь знань 10 «Природничі науки»)

Актуальність обраної теми дослідження.

Дробові статистики широко використовують у описі систем із різними типами взаємодій. Це пов’язано, зокрема з тим, що в експериментах існує можливість детектування частинок, де ефективно виникає дробовий заряд. Очевидно, найпоширенішим та найвідомішим прикладом такого є дробовий квантовий ефект Холла, що виникає в сильних магнітних полях у двовимірному просторі.

Водночас, особливо перспективними частинками для досліджень можна вважати еніони, в яких при перестановці двох частинок фаза хвильової функції може набувати довільного значення. Це пов’язано з їх можливим практичним застосуванням, зокрема, для створення топологічного квантового комп’ютера, який теоретично мав би бути набагато більш стійкішим до перешкод та помилок ніж звичайний квантовий комп’ютер. Окрім того, практичне застосування дробових статистик полягає у тому, що вони є зручними модельними об’єктами для опису і вивчення природи різних фізичних систем, зокрема багатобозонних систем із різними типами взаємодій.

Зважаючи на те, що об’єктами дослідження дисертаційної роботи є система еніонів у сталому магнітному полі з магнітними зарядами, які можуть ефективно виникати в конденсованих середовищах, фермі–газ у різних модифікаціях; неабелеві еніони у моделі з жорсткою та м'якою серцевиною, фермі–газ з контактною взаємодією, можна з впевненістю говорити про важливість наукової і прикладної проблематики дисертаційної роботи.

Про актуальність дисертаційної роботи свідчить також її відповідність держбюджетним темам 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), «Класичні та квантові системи за межами стандартних підходів: електродинаміка у просторах вищої вимірності» (2016 р., номер д/р 0116U005055), у межах яких здобувач працював як виконавець. Частина досліджень також виконувалась у межах проєкту Ф64/37-2016 від ДФФД України.

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів.

Робота присвячена дослідженню термодинаміки систем, що можуть бути ефективно описані через дробові статистики.

У першому розділі висвітлено теоретичні основи еніонів та неадитивних модифікацій, а також особливості їх застосування. У ньому подано інформацію про історичні передумови та сучасний стан досліджень з відповідними посиланнями.

У другому розділі опрацьовано проблему системи еніонів у сталому магнітному полі, що окрім електричного мають також і магнітний заряд, який може ефективно виникати в окремих типах середовищ. Показано підхід, який дозволяє дослідити термодинаміку такої системи, зокрема, розраховано магнітну сприйнятливість.

Третій розділ містить результати досліджень неадитивних модифікацій фермі–газу q-експонентою Цалліса. Опрацьовано два підходи, які відрізняються між собою вибором змінної у показнику експоненти у факторі Гіббса. Для обох моделей зроблено детальний опис у двох граничних випадках — високі та низькі температури. Для однієї моделі виявлено неочікуваний результат — відхилення від третього закону термодинаміки в границі низьких температур. У цьому розділі детально описано розрахунки основних термодинамічних функцій.

У четвертому розділі наведено результати дослідження фізичних систем та їх ефективне моделювання за допомогою двопараметричних дробових статистик на прикладі фермі–газу зі слабкою взаємодією. Використовуючи віріальні коефіцієнти подано зв’язок між параметрами еніонів та дробових двопараметричних статистик. Питання опрацьовано як для абелевих, так і для набелевих еніонів з різними типами жорсткості серцевини — м’якої і твердої. Цей розділ також містить порівняння та зв’язок між різними типами віріальних коефіцієнтів, котрі можна знайти в науковій літературі.

Результати та висновки дисертації є достатньо **обґрунтованими**. Це зумовлено різносторонністю проведених досліджень, а також різноманітністю

вдало підібраних теоретичних підходів. У формулюванні основних результатів та висновків автор не задовольняється тільки констатацією конкретних результатів, які випливають з опрацювання поставлених задач, але й долучає відповідну кількісну, або ж принаймні, якісну інтерпретацію виявлених ефектів, а також використовує методи комп'ютерного числення. **Достовірність** результатів дисертації забезпечена використанням сучасних теоретичних підходів, порівнянням даних автора з відповідними теоретичними і експериментальними результатами інших науковців. Отримані результати є достатньо переконливими, науково обґрунтованими, а їхній аналіз проведений з урахуванням останніх даних наукової літератури. Рукопис дисертації написаний з використанням адекватної фахової термінології.

Не викликає жодних сумнівів **наукова новизна** опонованої дисертації, яка полягає насамперед у тому, що вперше:

1) запропоновано спосіб розрахунку термодинамічних функцій магнітозаряджених еніонів з врахуванням еніонного параметра;
2) продемонстровано цікаві результати детального аналізу змодифікованого фермі–газу q-експонентою Цалліса; розраховано параметри системи змодифікованого фермі–газу, в якому питома теплоємність набуває ненульового значення за низькотемпературної границі $T \to 0$;
3) проаналізовано межі опису еніонів через двопараметричні дробові статистики;
4) на основі аналізу другого віріального коефіцієнта проведено дослідження фермі–газу з контактною взаємодією.

Повнота викладу основних результатів дисертації в публікованих працях. За темою дисертації підготовлено 11 публікацій: 6 статей, з яких 4 опубліковано у наукових журналах, що індексуються у наукових базах Scopus та Web of Science, 5 тез доповідей у збірках матеріалів наукових конференцій. На основі аналізу обсягу і змісту публікацій Собко Б. Ю. можна стверджувати, що вони цілковито відображають результати дисертації. В розділах детально описані усі результати проведених досліджень, які необхідні для розкриття теми дисертації, досягнення її мети й обґрунтування наукової новизни. Загальні висновки роботи підтверджують, що всі поставлені в дослідженні завдання виконані.

Значущість дослідження для науки і практики. Отримані результати мають важливе наукове значення для фундаментальної науки та прикладного застосування у пристроях комп'ютерної техніки та для опису термодинаміки конденсованих середовищ, що також мають широке практичне застосування. Практична цінність роботи також пов'язана з використанням ідеального газу зі змінними, які є «підіпсутими» статистиками, що передбачає перспективність ефективного моделювання реальних систем.

Наведені в дисертації результати закладають науковий фундамент для майбутніх досліджень у напрямі вивчення конденсованих систем, де ефективно виникають як дробові, так і магнітні заряди, а також для ефективного моделювання реальних систем.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації. Водночас до дисертаційної роботи можна зробити такі зауваження та побажання:

1) подекуди виклад дисертаційної роботи ведеться від першої особи множини, хоча, безсумнівно, що наукові результати отримані автором дисертації, тому варто було б писати в безособовій формі або використовувати особові форми: «автор дисертації» чи «здобувач наукового ступеня» тощо;
2) занадто лаконічно описані методики визначення поправок окрім порахованої поправки до магнітної сприйнятливості. Зважаючи на те, що термодинаміку будь-якої системи зазвичай описують декількома функціями для отримання загальної картини, то детальне обговорення цього питання в дисертації було б доцільним;
3) зважаючи на те, що одним з важливих завдань дисертаційної роботи був детальний опис термодинаміки для обох моделей модифікованого q-експонентою Цалліса фермі–газу, виникає питання стосовно питомої ізохорної теплоємності в границі низьких температур. Для повноти картини було б доцільно подати інформацію про інтерпретацію можливих від'ємних температур для поставленої задачі.

Зазначені зауваження та побажання у жодному разі не впливають на високу оцінку дисертації Собко Б. Ю., не знижують її наукової та практичної цінності, а спрямовані на активізацію подальшого наукового пошуку автора.

Відсутність порушень академічної доброчесності. У дисертаційній роботі Собко Б. Ю. і її наукових публікаціях не виявлено порушень академічної доброчесності.

Загальний висновок та оцінка дисертації. В цілому дисертаційна робота Собко Богдани Юріївни «Термодинамічні функції систем із дробовими статистиками» є завершеною науковою працею в межах поставлених завдань, в якій розв'язана наукова проблема щодо встановлення впливу модифікації q-експонентою Цалліса на фермі–газ та детальний опис термодинаміки такого, аналіз застосовності дробових статистик до використання в рамках опису еніонів різних типів та ефективне моделювання реальних систем на прикладі фермі–газу з контактною взаємодією.

Дисертаційна робота Собко Богдани Юріївни «Термодинамічні функції систем із дробовими статистиками» відповідає галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» та вимогам наказу МОН

України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та п. 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а Собко Богдана Юріївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика і астрономія».

Офіційний опонент:
завідувач кафедри прикладної математики
Інституту прикладної математики
та фундаментальних наук
Національного університету
«Львівська політехніка»,
доктор фізико-математичних наук,
професор Богдан МАРКОВИЧ

Підпис професора Богдана Марковича засвідчую:
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка», к.т.н., доцент Р. Б. Брилинський