

Відгук

офіційного опонента

провідного наукового співробітника відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», доктора фізико-математичних наук, старшого

дослідника

Сотнікова Андрія Геннадійовича

на дисертаційну роботу

Верхоляка Тараса Михайловича

«Квантові флуктуації та фрустрації у низьковимірних спінових моделях: точні результати і пертурбативний аналіз»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук (доктора наук) за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (104 — Фізика та астрономія)

Дисертаційна робота Т.М. Верхоляка присвячена теоретичному опису низьковимірних спінових моделей магнетиків зі спіном $1/2$. У дисертаційній роботі наведено результати аналітичних та числових розрахунків, які прояснюють особливості динамічної поведінки та термодинамічні властивості квантових магнетиків різних конфігурацій за низьких температур для випадків різної анізотропії, регулярних і випадкових неоднорідностей, магнітних фрустрацій та наявності зовнішнього магнітного поля. На цей момент прецезійні обчислення та аналіз часових кореляційних функцій є складною проблемою у низьковимірних квантових спінових моделях, оскільки квантові флуктуації зазвичай руйнують класичне впорядкування і призводять до появи дробових елементарних збуджень, що має прояв у протяжних частотних профілях у динамічних структурних факторах і відповідних динамічних сприйнятливостях. Вплив анізотропії, антисиметричної взаємодії Дзялошинського-Морія та інших особливостей магнітних зв'язків на макроскопічні характеристики важко наперед передбачити. Отже, розрахунок частотних залежностей динамічних структурних факторів і сприйнятливостей та аналіз відповідних експериментальних даних є однією з пріоритетних задач фізики конденсованого стану. З практичної точки зору результати дисертаційної роботи можуть бути використані для пояснення експериментів з електронного парамагнітного резонансу та непружного розсіяння нейтронів на кристалічних сполуках. Таким чином, тема дисертаційної роботи Т.М. Верхоляка є беззаперечно **актуальною**. Варто відзначити, що дисертантом виконано належну апробацію результатів на міжнародних конференціях і симпозіумах світового рівня.

Актуальність досліджень дисертаційної роботи Т.М. Верхоляка підтверджується також тим, що вони є складовою частиною низки дослідницьких

проектів, які виконувались у рамках держбюджетних тем і міжнародних програм Інституту фізики конденсованих систем НАН України.

Дисертаційна робота складається з вступної частини, семи основних розділів, висновків, списку літератури та двох додатків. Розглянемо результати основних розділів у відповідній послідовності.

У **першому розділі** наведено огляд квантових властивостей низьковимірних спінових систем та впливу фрустрації на їхню поведінку у магнітному полі та при низьких температурах. Також перераховано основні та найефективніші теоретичні підходи щодо їх опису, а також наявні складнощі та нерозв'язані проблеми. Зокрема, зазначено наслідки теореми Мерміна-Вагнера, що вказує на можливість реалізації стану квантової спінової рідини в основному стані одновимірних квантових систем, які мають неперервну симетрію гамільтоніанів у спіновому просторі.

У **другому розділі** досліджено динаміку одновимірних ланцюжків зі спіном $1/2$ та симетрією взаємодії типу XU , наведено точні результати для моделі таких систем та проаналізовано вплив симетричної та антисиметричної анізотропії на динамічний структурний фактор моделі. Зазначено, зокрема, що у той час як динамічні структурні фактори x_x і u_y мають багатоферміонні збудження, двоферміонні збудження домінують у поведінці таких матеріалів при низьких температурах — ці величини демонструють кілька розмитих гілок збуджень, які відповідають конкретним лініям двоферміонних континуумів збуджень.

Третій розділ присвячено розгляду періодичних та випадкових ланцюжків, де неоднорідність задано знаком обмінної взаємодії. Показано, що випадковість такої взаємодії змінює поведінку x_u кореляційних функцій зі степеневої на експоненційно загасаючу. Пояснено, як це впливає на динамічний структурний фактор випадкових моделей. Розглянуті моделі демонструють досить складну поведінку, яку можна пояснити відповідними властивостями базової однорідної моделі. Слід також наголосити, що в рамках наведених досліджень отримано точні аналітичні результати для динамічних структурних факторів декількох періодичних і випадкових квантових спінових ланцюжків.

У **четвертому розділі** досліджено фрустровані квантові драбинки, а саме зигзаг драбинку і ромбічний ланцюжок, для яких знайдено представлення безспінових ферміонів за допомогою перетворення Йордана-Вігнера. Для отриманого гамільтоніану взаємодійних ферміонів проведено наближення типу Гартрі-Фока та проаналізовано його застосовність. Зазначено, що згадана схема опису дає змогу відтворити точний результат у випадку фази синглетних димерів, а також дає задовільні результати поблизу неї.

У **п'ятому розділі** досліджено точно розв'язну модель двоногої драбинки на вузлах якої розташовані частинки зі спіном $1/2$. Магнітна взаємодія відбувається за типом Гайзенберга та Ізинга. Автором отримано фазову діаграму основного стану та квантові фази, які виникають внаслідок фрустрації взаємодій та зовнішнього поля. Виявлено, що гібридна модель Ізинга-Гайзенберга відтворює дробове плато $1/2$ відповідної квантової моделі Гайзенберга.

Шостий розділ присвячено теоретичному аналізу спінів-1/2 ортогонально-димерних моделей для одно- та двовимірних просторових геометрій ґраток. Знайдено точний розв'язок для квантового спінів-1/2 ортогонально-димерного ланцюжка Ізинґа-Гайзенберґа зі взаємодією типу Гайзенберґа всередині димера та типу Ізинґа між спінами на сусідніх димерах в магнітному полі.

У **сьомому розділі** автором розглянуто ряд одно- та двовимірних моделей на декорованих ґратках. За допомогою ряду аналітичних та числових підходів отримано фазову діаграму основного стану, процес намагнічування та низькотемпературну термодинаміку спінів-1/2 октаедричного ланцюжка Гайзенберґа. Також продемонстровано, що ділянка сильно фрустрованих параметрів фазової діаграми основного стану може бути точно знайдена в межах варіаційного принципу та підходу локалізованих маґнонів.

Таким чином, у дисертаційній роботі Т.М. Верхоляка шляхом розвинення та використання методів опису низьковимірних спінових моделей за допомогою точних і пертурбативних підходів, **отримано ряд нових важливих результатів та розвинено сучасні методи теоретичного дослідження**. Дисертація повністю відповідає спеціальності **01.04.02 «Теоретична фізика»**.

На мою думку, до **найбільш цікавих наукових результатів**, що отримані в дисертаційній роботі, можна віднести побудову фазової діаграми основного стану спінів-1/2 моделі Гайзенберґа на ґратці Шастри-Сазерленда в площині $J'/J-h/J$. Дисертантом обраховано значення критичних полів у рамках теорії збурень, яка була розроблена з точно розв'язної моделі Ізинґа-Гайзенберґа. Результати порівняно з іншими сучасними числовими методами iPEPS і CORE. Побудова фазової діаграми в широких інтервалах прикладених полів і різних відношень амплітуд між димерною і міждимерною взаємодіями та розробка потужних теоретичних підходів до належного опису спінової моделі, яка описує сильнокорельовані стани квантових систем багатьох тіл, підтверджує **фундаментальне теоретичне значення** отриманих результатів. Слід зазначити, що отримані результати охоплюють режими, що є близькими до мікроскопічних параметрів двовимірної магнітної сполуки $\text{SrCu}_2(\text{VO}_3)_2$ з експериментально спостереженою складною послідовністю дробових плато. Таким чином, отримані у дисертації **результати та розвинуті методи мають практичне значення**.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертації теоретичних результатів забезпечується застосуванням сучасних добре апробованих методів математичної та теоретичної фізики. У рамках застосованих модельних припущень наукові положення, висновки, сформульовані у дисертації, є цілком обґрунтованими.

Окрім організацій, у яких проводились семінари дисертанта за темою дисертації, вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Т.М. Верхоляка фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Київський академічний університет, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна, Інститут магнетизму (м. Київ).

За змістом дисертації можна зробити такі зауваження:

1) У розділі 1.3, який присвячено методології досліджень низьковимірних спінових моделей, доречно згадано метод ренормгрупи для матриці густини (DMRG), який є доволі ефективним прецизійним варіаційним підходом розробленим для одновимірних систем. Далі автор переходить до опису можливостей методу Монте-Карло для моделей на ґратках більших просторових вимірностей. У цьому контексті хотілося б зазначити, що останнім часом варіаційні підходи, зокрема метод проєктованих станів заплутаних пар (PEPS) або його узагальнення для нескінченних систем iPEPS (згаданий у розділі 1.1 для ґратки Шастри-Сазерленда), набули значного розвитку та активно використовуються для досліджень двовимірних (і навіть тривимірних) систем для широкого кола просторових геометрій ґраток. З цієї точки зору, можливо, було б доречним розширити огляд відповідним обговоренням з додатковими посиланнями.

2) У розділах 3.1 і 3.2 розглянуто спінові ланцюжки з випадковим розподілом амплітуди взаємодії між сусідніми спінами. У контексті близькості досліджених гамільтоніанів до моделей спінового скла (зокрема, моделі Шерінгтона-Кіркпатріка), було б важливо отримати коментарі, чи можна в певних граничних випадках побачити ознаки встановлення режиму багаточастинкової локалізації (MBL) на досліджуваних ланцюжках? Яка при цьому вбачається роль додаткової взаємодії типу Дзялошинського-Морія?

3) У розділі 7.3 наведено гібридну модель взаємодійної спін-електронної системи на подвійно декорованій квадратній ґратці. При цьому перші доданки гамільтоніану відповідають добре відомій моделі Фермі-Габбарда. Було б доречним у цьому розділі явно назвати цю модель і навести декілька посилань з характерними прикладами її виведення. З огляду на те, що спінові моделі на ґратках можуть бути виведені з більш загальних гамільтоніанів Фермі-Габбарда, важливо було б отримати коментарі, наскільки наближення локалізованих спінів застосовні для розглянутих в дисертації прикладів сполук, що наведені в пунктах 5 і 6 висновків дисертації.

Хотів би, однак, зазначити, що перелічені зауваження є оглядового характеру не впливають на отримані автором дисертації результати і на загальну високу оцінку роботи. Дисертація добре структурована і написана належною для роботи науковою мовою. Основні результати опубліковано, зокрема, у 31 статті в провідних наукових виданнях з високими імпаکت-фактором. При цьому, очевидно, що основний внесок у роботу належить особисто дисертанту. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Опубліковані роботи повно і вірно відбивають зміст і висновки дисертаційної роботи, а також особистий внесок здобувача. Дисертація Т.М. Верхоляка є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: досліджено динамічні та низькотемпературні явища у низьковимірних системах за допомогою точних методів та пертурбативних підходів.

Вважаю, що, враховуючи актуальність обраної теми, новизну та наукову значущість отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, дисертаційна робота «Квантові флуктуації та фрустрації у низьковимірних спінових моделях: точні результати і пертурбативний аналіз» повністю задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема, п.п. 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р.), а її автор, Тарас Михайлович Верхоляк, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук (доктора наук) за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (104 — Фізика та астрономія).

Офіційний опонент

доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник
відділу статистичної фізики та квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

Андрій СОТНІКОВ

Підпис А.Г. Сотнікова ЗАСВІДЧУЮ

Т.в.о. директора ІТФ ННЦ ХФТ
кандидат фіз.-мат. наук



Леонід ДАВИДОВ