

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Крупницької Олеси Михайлівни «Фрустровані квантові антиферромагнетики Гайзенберга. Поблизу парадигми локалізованих магнонів» подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню в області фрустрованого магнетизму. Інтерес світової наукової спільноти до квантових низьковимірних магнетиків значно посилюється після відкриття купратних високотемпературних надпровідників, що виявилися легованими квазідвовимірними антиферромагнетиками зі спіном одна друга. Вплив носіїв струму на магнітну підсистему купратних надпровідників призводить до порушення антиферромагнітного порядку. Цей вплив часто моделювався через фрустрацію в магнітній підсистемі. Трохи пізніше виявилось, що сімейство купратів є надзвичайно багатим і містить велику кількість сполук з найцікавішими магнітними властивостями, для моделювання яких потрібно використовувати модель Гайзенберга та її узагальнення з різноманітною геометрією зв'язків та конкуруючих взаємодій. Фрустрованими магнетиками називають сполуки, в яких індивідуальні магнітні моменти іонів відчувають вплив взаємодій протилежних знаків від оточуючих магнітних моментів. Дослідження фрустрованого магнетизму є одним з найбільш цікавих розділів сучасної квантової теорії твердого тіла, який бурхливо розвивається. Результати представлені в дисертації є вагомим внеском у цю область знань.

Магнітна фрустрація може виникати на простих ґратках внаслідок конкуренції обмінних взаємодій між сусідніми і наступними після сусідніх спінів. Інший приклад – так звана «геометрична фрустрація» - взаємодія найближчих спінів на ґратках зі складнішою геометрією (найпростіші приклади -

гранецентрована кубічна ґратка, трикутна двовимірна ґратка). В багатьох випадках фрустрація призводить до складного далекого магнітного порядку – Неелевського стану з великою кількістю магнітних підґраток, чи гелімагнетизму. Але в системах зі спіном одна друга фрустрації і квантові флуктуації можуть приводити до цілковитого зникнення далекого магнітного порядку і появи різних станів з екзотичними властивостями. Системи такого роду стали об'єктом дослідження в дисертаційній роботі, а саме спеціальний клас моделей, які в сильних магнітних полях допускають існування в нескінченній періодичній ґратці цілком локалізованих збуджень, які називають локалізованими магнонами.

Дисертація складається із вступу, першого розділу, де представлено огляд основних робіт та методів, п'яти оригінальних розділів, в яких наведено результати досліджень дисертантки, а також висновків, списку використаної літератури та шести додатків.

У **вступі** сформульовано актуальність теми дисертаційної роботи, представлено її зв'язок з науковими планами, висвітлено наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, сформульовано мету і завдання, подано список основних публікацій та коротку структуру дисертації.

У **першому розділі** дисертаційної роботи подається огляд літератури, пояснено концепцію локалізованих магнонів. Показано, що певний клас фрустрованих квантових антиферомагнетиків в режимі сильних магнітних полів та низьких температур допускає існування станів локалізованих магнонів з найменшою енергією і це дає можливість детально дослідити властивості таких систем. Локалізовані магнони існують лише в ідеальному випадку так званої плоскозонної геометрії ґратки, коли одномагنونна зона з найменшою енергією строго бездисперсійна. Але, як зазначено у другій частині першого розділу, реальні фрустровані квантові антиферомагнетики містять відхилення від ідеальних моделей. Врахування цих відхилень в узагальненій моделі Гайзенберга та їх

дослідження складає суть задач, які також сформульовано в першому розділі, та розв'язано в наступних розділах даної дисертаційної роботи.

У **другому розділі** досліджені магнітні характеристики деформованого фрустрованого ромбічного антиферромагнітного ланцюжка Гайзенберга, що мотивовані результатами експериментів для природного мінералу азуриту. Набір обмінних взаємодій для азуриту не відповідає умовам ідеальної геометрії, але не аж так далеко відхиляється від нього, що дозволяє отримати приблизну формулу для статистичної суми, а значить і для вільної енергії і всіх термодинамічних функцій спінової системи - намагніченості, ентропії та теплоємності. Отримані теоретичні результати узгоджуються з експериментальними даними і результатами точної діагоналізації.

У **третьому розділі** досліджено ефекти малих відхилень від умов, що забезпечують строгую локалізацію магнонів. Використовуючи операторну теорію збурень, побудовано низькоенергетичні ефективні гамільтоніани для ромбічного і димер-плакетного спінових ланцюжків та для ґратки квадратне кагоме. За допомогою числових розрахунків перевірено, що ефективні гамільтоніани добре описують магнітні властивості систем в сильних полях при низьких температурах. В ефективній моделі для двовимірної ґратки квадратне кагоме досліджено фазовий перехід Березінського-Костерліца-Таулеса.

Крім малих відхилень від ідеальної геометрії, у реальних сполуках внаслідок релятивістських взаємодій завжди присутня магнітна анізотропія. Тому в **четвертому розділі** досліджено спін-1/2 антиферромагнітну XXZ модель на деформованому ромбічному спіновому ланцюжку в довільно орієнтованому зовнішньому магнітному полі. Знову, використовуючи операторну теорію збурень разом з наближенням сильного зв'язку, отримана та досліджена ефективна модель, що дозволяє описати залежність кривої намагніченості від напрямку прикладеного зовнішнього магнітного поля та оцінити величину анізотропії в азуриті та інших реальних сполуках.

У п'ятому розділі дисертації продовжено розгляд впливу анізотропії, проведено дослідження моделі Ізинга-Гайзенберга на фрустрованому ромбічному ланцюжку.

В шостому розділі дисертації розглянута анізотропна модель Гайзенберга на фрустрованому ромбічному ланцюжку у магнітному полі з урахуванням міжланцюжкових взаємодій, що також завжди присутні в реальних сполуках. Використовуючи наближення сильного зв'язку, побудовано ефективний гамільтоніан. Методом точної діагоналізації досліджено криві намагніченості для вихідної та ефективних моделей. Показано, що за наявності міжланцюжкових взаємодій в системі стрибок кривої намагніченості, зумовлений локалізованими магнонами, розмивається.

Однак, дисертація містить і ряд недоліків. Деякі графіки (рис. 2.4, 3.11, 6.3, 6.4) виглядають переобтяженими, мабуть краще було б представити дані на більшій кількості рисунків. Є також недосконалість позначень в деяких формулах. Наприклад, число комірок та число вузлів в формулах для статистичної суми (2.5), (2.6) позначені однаковою літерою N і відрізняються лише шрифтом. Співвідношення між двома величинами читач має шукати в тексті, що розташований на дві сторінки попереду.

Слід зауважити, що вищевказані недоліки не зменшують важливості результатів досліджень дисертаційної роботи, які мають наукову цінність й новизну.

Загальні **висновки**, подані в кінці роботи, достатньо відображають головні наукові результати, а матеріал, представлений у додатках, повніше розкриває зміст одержаних результатів. Результати наукових досліджень Олеси Михайлівни Крупницької викладено в дисертації послідовно і логічно. Видно, що автор добре володіє аналітичними та чисельними методами сучасної теоретичної фізики магнетизму. Автореферат дисертації за структурою та змістом відповідає вимогам МОН України щодо оформлення. Основні результати опубліковані у провідних

вітчизняних та міжнародних журналах, доповідались на міжнародних конференціях та семінарах.

Загалом, дисертаційна робота п. Крупніцької містить ряд нових оригінальних результатів та задовольняє всі вимоги МОН України, які ставляться до кандидатських дисертацій, а дисертантка заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика.

Офіційний опонент:

старший науковий співробітник
відділу функціональних оксидних матеріалів
Інституту проблем матеріалознавства НАНУ,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Р.О. Кузян

Підпис Р.О. Кузяна засвідчую
Вчений секретар ІМ НАНУ
к.ф.-м.н., с.н.с.



В.В. Картузов