

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Дудки Максима Леонідовича**

**«КРИТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАГНЕТИКІВ: ВПЛИВ СТРУКТУРНОГО  
БЕЗЛАДУ, АНІЗОТРОПІЇ, ФРУСТРАЦІЙ»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика

Сьогодні важко назвати ще одну область фізики, яка дістала таке широке застосування як сучасна теорія фазових переходів. Виявлені за її допомогою спільні закономірності явищ, які відбуваються в ідеалізованих модельних системах поблизу критичних точок, дозволяють інтерпретувати не тільки властивості поведінки традиційних фізичних об'єктів, але й особливості колективних процесів у біологічних, економічних та соціальних системах. Однак є ще багато проблем, які виникають і при дослідженні звичайних фізичних систем та потребують свого вирішення. Це, зокрема, стосується питання про вплив на критичну поведінку магнітних систем особливостей, що характеризують реальні магнетики.

Саме ефектам у критичній поведінці магнетиків, які спричиняють такі особливості, як структурна неоднорідність, анізотропія, фрустрації, а також скінчені розміри, і присвячена дисертація Дудки М. Л. Актуальність цього дослідження зумовлена також бурхливим розвитком сучасної техніки та технологій, що потребує знань про неупорядковані та обмежені матеріали в критичних умовах. Основним методом дослідження обрано метод теоретико-польової ренормалізаційної групи, який вже став стандартним для дослідження критичної поведінки у статистичній фізиці. У цьому підході використовується теорія збурень за константами зв'язку та методи пересумовування рядів, які отриманих за допомогою цієї теорії. Також, для окремих задач використано непертурбативний варіант ренорм-групи та чисельний експеримент методом Монте-Карло.

Дисертація Дудки М. Л. складається зі вступу, розділу з оглядом літератури, шести оригінальних розділів, основних висновків, списку використаної літератури та додатків.

Вступ містить усі необхідні характеристики дисертаційної роботи, які регламентовані вимогами щодо оформлення дисертацій.

У першому розділі дисертації оглянуто праці з проблематики дисертації, включаючи теоретичні й експериментальні дослідження та дослідження за допомогою методів комп'ютерного експерименту. Також, у цьому розділі подано опис основного методу дослідження — пертурбативної теоретико-польової ренормгрупи.

Перші три розділи з оригінальними результатами стосуються динамічної критичної поведінки тривимірних магнітних систем з різними типами структурних неоднорідностей. Так, другий розділ дисертації присвячений вивченню анізотропного скейлінгу, який проявляється у системах зі замороженим безладом у вигляді протяжних паралельних немагнітних домішок. Опис критичної динаміки в таких системах опирається на рівняння моделі А, яка розглядає рівняння руху лише для параметра порядку, що не підпорядковується законам збереження та повільна зміна якого з плином часу визначає всю динаміку системи. Отримані значення динамічних критичних показників, які характеризують релаксацію параметра порядку вздовж двох напрямків (паралельного і перпендикулярного до домішок) демонструють підсилення критичного сповільнення порівняно зі системами з безладом типу випадкових вузлів. Саме існування теоретично передбаченого анізотропного скейлінгу для таких систем було підтверджено в дисертації за допомогою чисельного експерименту методом Монте–Карло для статичного випадку. Також, у цьому розділі отримано ефективні критичні показники, що характеризують підхід системи до асимптотичного критичного режиму.

У третьому розділі досліджено вплив на критичну поведінку іншого типу замороженого безладу, а саме: випадкової анізотропії. Результати застосування ренормгрупи до моделі з випадковою анізотропією з розподілом дозволених орієнтацій осі випадкової анізотропії, який є комбінацією, так званих, «ізоанізотропного» та «кубічного» розподілів, відомих

у літературі, привели до висновку про відсутність фазового переходу другого роду в такій системі, що підтвердило відомі результати про можливість існування критичної точки тільки для дискретного «кубічного» розподілу. Для цього розподілу під час дослідження критичного сповільнення показано, що хоча у цьому випадку асимптотична динамічна критична поведінка є такою ж, як і для моделі Ізінга з випадковими вузлами, але у неасимптотичному режимі можуть реалізуватись різні сценарії ефективної динамічної критичної поведінки залежно від початкових параметрів моделі, зокрема, від ступеня безладу.

На відміну від двох попередніх розділів у четвертому розділі критична динаміка систем із безладом розглядалась у межах моделі С, яка враховує в описі також величину, яка підпорядковується закону збереження (наприклад, енергію), але її зв'язок із параметром порядку розглядається на рівні статичного гамільтоніану з незалежними рівняннями руху. Перед розглядом впливу безладу спочатку було розглянуто дві задачі, що стосуються чистої моделі С. Зокрема, отримано оцінку для універсального динамічного відношення амплітуд характеристичних частот параметра порядку та енергії, а також здійснено узагальнення виразу для цього відношення у параметричній площині кореляційної довжини та хвильового вектора. На основі високих порядків, які відомі для простіших моделей, показано узгодження опису фазової діаграми моделі С у параметричному просторі вимірності простору та вимірності параметра порядку в підході пертурбативної ренормгрупи з результатами непертурбативного підходу для фізично значимих випадків. Для магнетиків із безладом структури у формі випадкових вузлів та для магнетиків із випадковою анізотропією з кубічним розподілом осі випадкової анізотропії було показано, що, хоча динамічна критична поведінка обох моделей із безладом є такою ж, як і для моделі Ізінга з випадковими вузлами, зв'язок параметра порядку з енергією приводить до іншої ефективної критичної поведінки. Зокрема, з'являються додаткові піки на залежностях ефективних динамічних критичних показників у порівнянні з ефективною критичною динамікою моделі А.

П'ятий розділ присвячений впливу структурної неупорядкованості на статичну критичну поведінку двовимірних систем. Тут розглянуто три моделі, опис яких опирався на представлення теорії поля з використанням ферміонних полів. Для моделі двовимірного магнетика з однокомпонентними спінами з нескорельованим безладом на основі розрахунку функцій розподілу імовірностей флуктуацій внутрішньої енергії та теплоємності показано, що внутрішня енергія не самоусереднюється, а теплоємність самоусереднюється. Для моделі такого ж магнетика зі скорельованим безладом, кореляції якого загасають з відстанню за степеневим законом, отримано, що модель належить до класу універсальності з критичним показником кореляційної довжини, що залежить від степеня цього загасання. Останньою досліджувалась двовимірна модель Ашкіна–Теллера з  $N$  кольорами зі скорельованим безладом, таким як і в попередньому випадку. Для неї показано приналежність до того самого класу універсальності, що і для двовимірної моделі Ізінга з далекосяжно скорельованим безладом.

Найменший шостий розділ дисертації стосується мультикритичної поведінки, яка спотерігається в анізотропних антиферомагнетиках у магнітному полі, що описуються теоретико-польовою моделлю з двома зв'язаними параметрами порядку. Аналізуючи залежність реалізації різних типів мультикритичної поведінки у цій моделі від вимірності простору та від вимірностей двох параметрів порядку, зроблено висновок, що у тривимірному магнетикі в магнітному полі, яке напрямлене вздовж осі анізотропії, в асимптотичній області реалізується тетрактична поведінка.

В останньому сьомому розділі вивчається фазовий перехід у неколінеарне впорядкування у фрустрованих магнетиках, які описуються моделлю з матричним параметром порядку, що представлений у вигляді двох  $n$  компонентних полів. Аналізуючи критичні показники, які розраховані у межах пертурбативної ренормгрупи з фіксованою вимірністю простору, показано значну залежність цих характеристик критичної поведінки для тривимірних магнетиків з  $n=2$  та  $n=3$  від параметрів процедури пересумовування, яка використовувалася для їх отримання. Застосовуючи непертурбативний варіант ренормгрупи,

знайдено граничне значення польової вимірності у тривимірному випадку  $n_c=5.24$ , що підтверджує відсутність фазового переходу другого роду для фізичних реалізацій фрустрованих магнетиків.

Загалом, характеризуючи дисертаційну роботу Дудки Максима Леонідовича, можна стверджувати, що робота, без сумніву, є актуальною, викладена послідовно на високому науковому рівні, містить глибокий аналіз отриманих результатів, має значне методологічне та фундаментальне значення.

Разом з тим, до дисертації та автореферату є такі зауваження та запитання:

- 1) скрізь у дисертації використовується займенник першої особи множини «ми», тоді як здобувачем наукового ступеня є одна особа. Тому варто було б використовувати безособову форму, як прийнято у науковій літературі і як використовує здобувач у авторефераті;
  - 2) у записах значної кількості інтегралів відсутні диференціали (див. в авторефераті формули (26) та (27), у дисертації — формули (4.42), (4.45), (4.46), (4.54), (4.59), (5.79), (6.18), (7.18), (7.19), (7.25), (7.27), (7.30), (7.36), (7.37), (7.45), (A.6), (A.8)–(A.13), (A.15) та всі інтеграли додатку В.3). Хоча і можна здогадатися за якою змінною відбувається інтегрування, а після формул (5.79) та (7.18) введено переозначення символу інтеграла на символ інтеграла з диференціалом, все-таки диференціали варто не опускати, особливо це стосується автореферату, в якому таке переозначення не вводиться.  
Трапляються описки, наприклад, на стор. 213 після формули (5.52) та на стор. 230 після формули (5.127) посеред речень стоять «?».
- Щодо оформлення: трапляється значна кількість вісячих рядків (див., наприклад, стор. 165, 176, 178, 232, 246, 256, 287, 317, 344, 350); серед українського тексту трапляються «Ref.», «Eq.», «from» (див. стор. 91, 109);
- 3) щодо процедури пересумовування: образ Бореля (1.71), який є функцією двох змінних  $u$  та  $s$ , є симетричним відносно заміни  $u$  на  $s$  та  $s$  на  $u$ . Натомість у запропонованій апроксиманті (1.72) ця симетричність втрачається. Тому виникає питання про допустимість такої апроксимації: чи таке штучне порушення симетрії не може

- вплинути на фізичну коректність кінцевих результатів? Логічно би було будувати симетричну відносно змінних  $u$  та  $s$  апроксиманту;
- 4) у дисертації зустрічається «обернене перетворення Бореля», а який вигляд має пряме перетворення Бореля?
  - 5) у формулі (1.11) стверджується, що характеристичний час релаксації поблизу точки фазового переходу дорівнює кореляційній довжині у степені  $z$ . Можливо, йдеться про пропорційність, а не рівність?
  - 6) у систему рівнянь Ланжевена (1.5) для усереднених змінних введено випадковий шум  $\theta$  і у дисертації вважається, що він описується розподілом Гаусса. У такому разі у правій частині формули (1.6) (для середнього  $\langle \theta_i(t)\theta_j(t') \rangle$ ) мав би бути символ Кронекера  $\delta_{ij}$ , тоді, враховуючи формулу (1.7), і кінетичні коефіцієнти  $L_{ij}$  будуть пропорційними до символу Кронекера  $\delta_{ij}$ , а отже, система рівнянь Ланжевена (1.5) розщепиться на непов'язані між собою рівняння. Тоді як буде реалізуватися взаємний вплив цих усереднених змінних? З огляду на третій висновок в авторефераті: «зв'язок незбережного параметра порядку зі збереженою величиною має значний вплив на ефективні критичні властивості цих магнетиків» виникає питання: як цей зв'язок описується на основі рівнянь Ланжевена з гауссовими загасаннями кореляцій?
  - 7) у динаміці магнітних систем важливо враховувати внутрішні магнітні поля, який їхній вплив в критичній області?
  - 8) для динаміки магнітних систем характерними є ефекти пам'яті в часі, наскільки це важливо у критичній області з огляду на те, що здобувач оперує часами релаксації?

Проте, висловлені зауваження не є принциповими та не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи Дудки М. Л. Отримані результати є науково обгрунтованими та достовірними. Основні результати дисертації опубліковано у високорейтингових рецензованих журналах, що індексуються в наукометричних базах Scopus та Web of Science, та активно цитуються іншими науковцями, які працюють в цій області. Крім того, більшість отриманих результатів доповідались на багатьох міжнародних та національних наукових конференціях. Автореферат дисертації відображає її зміст і оформлений відповідно до вимог МОН України.

На мою думку, дисертаційна робота Дудки М. Л. «Критичні властивості магнетиків: вплив структурного безладу, анізотропії, фрустрацій» відповідає всім вимогам до докторських дисертацій, які регламентовані «Порядком присудження наукових ступенів», що затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року, а її автор Дудка Максим Леонідович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Професор кафедри прикладної математики  
Національного університету  
«Львівська політехніка»,  
д.ф.-м.н., проф.

Б. М. Маркович

Підпис професора Б. М. Марковича засвідчую:

Вчений секретар  
Національного університету  
«Львівська політехніка», к.ф.н., доц.



Р. М. Брилинський