

Затверджую

Директор Інституту фізики
конденсованих систем НАН України
д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. НАН України

Т. М. Брик

“8” грудня 2024 р.

Висновок

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
“Колективна поведінка на складних мережах: фундаментальні аспекти та застосування”
здобувача ступеня доктора фізико-математичних наук Мар’яни Богданівни
КРАСНИЦЬКОЇ**

за спеціальністю 01.04.02 – “теоретична фізика”

4.1. Актуальність теми дисертації

Фізики почали аналізувати мережі лише нещодавно — перші статті датуються кінцем 1990-их років. Мета досліджень змінилася від аналізу невеликих графів та властивостей окремих вершин і ребер до розгляду статистичних властивостей цих графів (мереж). Зі зміною мети змінилися й методи аналізу. Народження “науки про мережі” відбулося внаслідок розвитку комп’ютерних технологій та засобів обробки великих масивів даних.

На сьогодні в мережевому формалізмі прийнято описувати взаємодії, що змінюються з часом, стохастичні взаємодії, взаємодії, що виникають на декількох рівнях і не вбудовані в евклідовий простір. Якщо додати можливість задавати різні стани для кожного агента-вузла, то стає зрозумілим успіх використання складних мереж як своєї рідної *lingua franca* науки про складні системи.

Дослідження колективної поведінки на складних мережах є надзвичайно важливим для розуміння процесів у багаточастинкових системах. Актуальність вивчення колективної поведінки зумовлена необхідністю вирішення низки фундаментальних та прикладних проблем, що виникають у сучасному світі. Традиційні методи аналізу складних систем базуються на спрощених припущеннях, часто не здатних описати складну специфіку та структуру реальних мереж, або обмежені застосуванням лише в одній галузі знань, тому виникає потреба в розробці нових моделей та підходів. Саме тому все частіше застосовують міждисциплінарні підходи та

узагальнені моделі для вивчення складних мереж і виявлення прихованих закономірностей. Важливим, а часто й визначальним, елементом таких підходів є застосування методів і концептуального апарату фізики, зокрема статистичної фізики та фізики фазових переходів.

4.2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами інституту та відділу

Дисертаційна робота виконана в Інституті фізики конденсованих систем НАН України, із науковою тематикою якого пов'язаний вибраний напрямок досліджень. Подані в дисертації результати отримані згідно з наступними проектами: FP7 EU IRSES, № IRSES project №612669 “Structure and Evolution of Complex Systems with Applications in Physics and Life Sciences (STREVCOMS)” (2015–2017); IRSES Project №612707 “Dynamics of and in Complex Systems” (2014–2018); Плани робіт у рамках бюджетних тем НАН України “Методи і моделі статистичної фізики для опису виникнення структур та пояснення скейлінгу у складних системах” (2018–2022 рр., номер держреєстрації 0118U003012); Темі “Багатомасштабність і структурна складність конденсованої речовини: теорія і застосування” (2012–2016 рр., номер держреєстрації 0112U003119) та “Нові концепції статистичного опису і їх застосування у теорії багаточастинкових систем” (2017–2021 рр., номер держреєстрації 0117U002093); 2017–2018: Проєкт НФДУ №76/105-2017 “Концепція складних мереж у задачах квантової фізики та космології” (0117U003869) (у співпраці з Астрономічною обсерваторією та кафедрою теоретичної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка); Грант від Польської АН-НАН України для короткострокового стажування у Польщі (2018 р.); 2020–2021: Проєкт НФДУ №2020.01/0338 “Комп'ютерне моделювання та теоретичні підходи до опису поширення інфекції COVID-19: роль просторової неоднорідності населення, гетерогенності мережі соціальних контактів та соціальної реакції”; Проєкт НАНУ для молодих вчених №07/01-2022(4) “Макромолекулярні утворення як складні системи: комп'ютерне моделювання та аналітичні підходи” (2022–2023); Грант для короткострокового стажування у Франції PAUSE programme (2022–2023); Проєкт НФДУ 023.03/0099 “Критичність складних систем: фундаментальні аспекти та застосування”.

4.3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

У 13 роботах, виконаних спільно зі співавторами, здобувачі належить:

- отримання аналітичних виразів для статистичної суми та вільної енергії моделі Поттса з невидимими станами на повному графі [1];
- аналіз мережі співавторства ЖФД в Україні [2];
- результати розділу: Універсальність, нулі статистичної суми й порушення теореми Лі–Янга для моделі Ізінга на безмасштабній мережі [3];
- отримання аналітичних виразів статистичної суми та вільної енергії моделі Поттса з невидимими станами на безмасштабній мережі [4,9];
- аналітичні розрахунки фазової діаграми моделі Ізінга зі змінною довжиною спіна [5,8];
- обговорення особливостей мережі наукових концепцій на базі препринтів ArXiv. Відбір

- загальних і специфічних концепцій [6,7];
- написання розділів 1, 2 та 4 у статті [10];
- отримання функціонального представлення вільної енергії структурно-невпорядкованого магнетика. Аналіз асимптотичної та ефективної критичної поведінки замороженої (quenched) суміші двох магнетиків [11];
- вибір моделі для комп'ютерної симуляції феромагнітного впорядкування у випадковій суміші двох магнетиків. Тестові симуляції структурно-впорядкованої 3D моделі Ізінга [13];
- отримання аналітичних виразів для точного та розкладеного представлення статистичної суми моделі Блюма-Капеля на повному графі. Аналіз нулів для наближеного представлення статистичної суми у комплексній площині [14].

Здобувачка брала безпосередню участь в обговоренні усіх результатів, опу- блікованих у спільних дослідженнях.

4.4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Для узагальнення моделі Ізінга зі змінною довжиною спіну на різних типах графів використовуючи наближення середнього поля було розраховано універсальні критичні характеристики фазового переходу другого роду, а саме - критичні показники, показники логарифмічних поправок, скейлінгові функції, відношення критичних амплітуд. Знайдено два нові класи універсальності для логарифмічних поправок моделі на відпаленій безмасштабній мережі. Для цієї ж моделі на тривимірній гратці отримано представлення для ефективного гамільтоніана (який належить до класу універсальності розведеної моделі Ізінга), а також, застосовуючи теорію ренорм-групи, знайдено асимптотичні та ефективні критичні показники. Отримані теоретичні результати підтверджено комп'ютерними симуляціями. Таким чином доведено, що домішки не обов'язково повинні бути немагнітними, щоб викликати однакові ефекти в критичній поведінці. Для моделі Блюма-Капеля вперше проаналізовано критичну поведінку на повному графі використовуючи формалізм нулів статистичної суми. Було застосовано методи теорії складних мереж для аналізу та візуалізації соціальної мережі співавторства авторів журналу та семантичної мережі понять. Показано як механізми росту мереж і їх динаміка реалізуються на практиці і до чого вони призводять, а також продемонстровано, як реальні мережі описуються запропонованими моделями при дослідженні колективних ефектів та структури самої складної мережі.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, повністю обґрунтовано теоретичним аналізом.

4.5. Ступінь новизни основних результатів дисертаційної роботи порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Для моделі Поттса з невидимими станами виявлено особливий тип критичної поведінки, що характеризується двома граничними значеннями числа невидимих станів, які відділяють різні

типи впорядкування. Вперше розглянуто модель на повному графі та на безмасштабній мережі у різних діапазонах параметрів. Показано, що додавання невидимих станів змінює неперервний перехід у моделі перколяції зв'язків на фазовий перехід першого роду.

Запропоновано нову спінову модель - модель Ізінга зі змінною довжиною (силою) спіна, що, зберігаючи симетрію спінів, враховує також можливість різної величини елементарного магнітного моменту. Показано, що впровадження спінів змінної довжини значно розширює фазову діаграму та зумовлює появу нових класів універсальності (для провідних значень критичних показників та показників логарифмічних поправок) у випадку, коли така модель розглядається на складних мережах (повному графі, графі Ердоша-Рені та безмасштабній мережі).

Запропоновано нову модель структурно-невпорядкованого магнетика, що належить до класу універсальності моделі Ізінга з розведеними вузлами. А саме, модель Ізінга зі спінами зі змінною довжиною, коли структурний безлад зумовлюється введенням не домішки (немагнітної компоненти), але іншого магнетика із відмінним значенням елементарного магнітного моменту.

Вперше здійснено опис і проаналізовано ефективну критичну поведінку моделі Ізінга зі змінною довжиною спіна на тривимірній регулярній ґратці використовуючи теорію ренорм-групи. Виконано Монте-Карло симуляції для дослідження ефективної та асимптотичної критичної поведінки моделі з двома довжинами спінів, що підтверджують теоретичні результати.

Формалізм Лі-Янга-Фішера вперше застосовано для аналізу фазових переходів в моделі Блюма-Капеля на повному графі. Знайдено асимптотики координат нулів в околі критичної та трикритичної точки для наближеного предстанення статистичної суми в площині комплексної температури (нулі Фішера), комплексного кристалічного поля (нулі кристалічного поля) та комплексного магнітного поля (нулі Лі-Янга).

При аналізі мереж концепцій препринтів arXiv було показано, що широко використовувані мережеві моделі -- Ердоша-Рені та Барабаші-Альберта -- не можуть згенерувати мережу з бажаними властивостями, як у реальній системі. Було запропоновано просту генеративну модель, де зростання мережі концептів відбувається не тільки за рахунок додавання нових вузлів і приєднання їх до вже існуючих у графі, а й за рахунок появи нових зв'язків між раніше існуючими вузлами. Показано, що для отримання задовільних результатів у моделюванні таких явищ необхідно враховувати два механізми: i) зростання за блоками та ii) переважний вибір понять.

4.6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

За матеріалами дисертації опубліковано 38 наукових праць, з них: 12 (27 з врахуванням кuartилів) статей у фахових наукових виданнях [1-12], з яких 7 статей [1,4,5,7,8,10,11] у виданнях віднесених до 2-го кuartилу (Q2), 1 стаття [6] 3-го (Q3) та 4 статті [2,3,9,12] 4-го (Q4),

2 статті подані до друку і опубліковані як препринти [13,14] та 24 тези конференцій [15-38].

СТАТТІ:

1. M. Krasnytska, P. Sarkanych, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna. Marginal dimensions of the Potts model with invisible states, J. Phys. A: Math. Theor., (2016), 49, 255001. **(Q2) Особистий внесок здобувача:** отримання аналітичних виразів для статистичної суми та вільної енергії моделі Поттса з невидимими станами на повному графі.
2. Ю. Головач, М. Красницька, О. Мриглюд, А. Ровенчак. 20 років “Журналу фізичних досліджень”: Спроба журналометричного аналізу, Журн. фіз. дослідж., (2017), 21(4), 4001. **(Q4) Особистий внесок здобувача:** аналіз мережі співавторства ЖФД в Україні.
3. Ю. Головач, М. Дудка, В. Блавацька, В. Пальчиков, М. Красницька, О. Мриглюд. Статистична фізика складних систем, Журн. фіз. дослідж., (2017), 22(2), 2801. **(Q4) Особистий внесок здобувача:** результати розділу: Універсальність, нулі статистичної суми й порушення теореми Лі–Янга для моделі Ізінга на безмасштабній мережі.
4. P. Sarkanych, M. Krasnytska. Ising model with invisible states on scale-free networks, Phys. Lett. A, (2019), 383(27), 125844:1–5. **(Q2) Особистий внесок здобувача:** отримання аналітичних виразів статистичної суми та вільної енергії моделі Поттса а Ізінга з невидимими станами на безмасштабній мережі.
5. M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna. Ising model with variable spin/agent strengths, J. Phys. Complex, (2020), 1, 035008. **(Q2) Особистий внесок здобувача:** аналітичні розрахунки фазової діаграми моделі Ізінга зі змінною довжиною спіна.
6. V. Palchykov, M. Krasnytska, O. Mryglod, Yu. Holovatch. A mechanism for evolution of the physical concepts network, Condens. Matter Phys., (2021), 24(2), 24001. **(Q3) Особистий внесок здобувача:** обговорення особливостей мережі наукових концепцій на базі препринтів ArXiv. Відбір загальних і специфічних концепцій.
7. V. Palchykov, M. Krasnytska, O. Mryglod, Yu. Holovatch. Network of scientific concepts: empirical analysis and modeling, Adv. Complex Syst., (2021), 21(1), 2140001. **(Q2) Особистий внесок здобувача:** обговорення особливостей мережі наукових концепцій на базі препринтів ArXiv. Відбір загальних і специфічних концепцій.
8. M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna. Generalized Ising model on a scale-free network: an interplay of power laws, Entropy, (2021), 23(9), 1175. **(Q2) Особистий внесок здобувача:** аналітичні розрахунки фазової діаграми моделі Ізінга зі змінною довжиною спіна.
9. P. Sarkanych, M. Krasnytska. Potts model with invisible states on scale-free network, Condens. Matt. Phys., (2023), 26(1), 13507. **(Q4) Особистий внесок здобувача:** отримання аналітичних виразів статистичної суми та вільної енергії моделі Поттса з невидимими станами на безмасштабній мережі.
10. M. Krasnytska, P. Sarkanych, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna. Potts model with invisible states: a review, Eur. Phys. J. Special Topics, (2023), 1951–6401. **(Q2) Особистий внесок здобувача:** написання розділів 1, 2 та 4 у статті.
11. M. Dudka, M. Krasnytska, J. Ruiz-Lorenzo, Yu. Holovatch. Effective and asymptotic criticality

- of structurally disordered magnets, *J. Magn. Magn. Mater.*, (2023), 575, 170718. **(Q2)**
Особистий внесок здобувача: отримання функціонального представлення вільної енергії структурно- неупорядкованого магнетика. Аналіз асимптотичної та ефективної критичної поведінки замороженої (quenched) суміші двох магнетиків.
12. M. Krasnytska. Ising model with varying spin strength on a scale-free network: scaling functions and critical amplitude ratios, *Condens. Matt. Phys.*, (2024), 27(3), 33603:1–10. **(Q4)**
 13. J. Ruiz-Lorenzo, M. Dudka, M. Krasnytska, Yu. Holovatch. Emergence of the 3D diluted Ising model universality class in a mixture of two magnets, *Phys. Rev. E*, (2024), accepted, arXiv:2411.16659. **Особистий внесок здобувача:** вибір моделі для комп'ютерної симуляції феромагнітного впорядкування у випадковій суміші двох магнетиків. Тестові симуляції структурно-впорядкованої 3D моделі Ізінга.
 14. Yu. Honchar, M. Krasnytska, Yu. Holovach, B. Berche, R. Kenna. Partition function zeros for the Blume-Capel model on a complete graph, *Low Temp. Phys.*, (2025), submitted, arXiv:2501.04452. **Особистий внесок здобувача:** отримання аналітичних виразів для точного та розкладеного представлення статистичної суми моделі Блюма-Капеля на повному графі. Аналіз нулів для наближеного представлення статистичної суми у комплексній площині.

ТЕЗИ КОНФЕРЕНЦІЙ:

15. M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, and R. Kenna. Critical behavior on complex networks: inhomogeneous mean-field vs Lee-Yang-Fisher formalism. In 42nd Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, page 27, Lyon, France, February 8-10 2017.
16. M. Krasnytska, P. Sarkanych, B. Berche, Yu. Holovatch, and R. Kenna. Marginal dimensions of the Potts model with invisible states. In 42nd Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, page 119, Lyon, France, February 8-10 2017.
17. M. Krasnytska, B. Berche, and Yu. Holovatch. Ising model with power-law spin length distribution. In Christmas Discussions 2018, Department for Theoretical Physics, Ivan Franko National University of Lviv, page 10, Lviv, Ukraine, January 11-12 2018. 36
18. M. Krasnytska, B. Berche, and Yu. Holovatch. Ising model with a power-law spin length distribution on different graphs. In 43rd Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, page 70, Krakow, Poland, May 1-4 2018.
19. М. Красницька, Б. Берш, and Ю. Головач. Модель Ізінга зі змінною довжиною спіна. In 18-та Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, Львів, Україна, Червень 7-8 2018. Тези доповідей.
20. M. Krasnytska, B. Berche, and Yu. Holovatch. New critical behaviour in a complex system induced by two competing power laws. In Workshop on Current Problems in Physics, page 11,

Lviv, Ukraine, July 3-4 2018.

21. Ю. Головач, Ю. Гончар, М. Красницька, and М. Дудка. Фізика і фізики в НТШ у Львові. In Різдвяні дискусії – 2019, кафедра теоретичної фізики ЛНУ ім. І. Франка, page 4, Львів, Україна, January 10-11 2019.
22. M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, and R. Kenna. Self-averaging on annealed networks. In 5th Conference on Statistical Physics: Modern Trends and Applications, dedicated to the 110th Anniversary of the Birth of M. M. Bogolyubov, page 40, Lviv, Ukraine, July 3-6 2019.
23. P. Sarkanych and M. Krasnytska. Ising model with invisible states on scale-free networks. In 5th Conference on Statistical Physics: Modern Trends and Applications, dedicated to the 110th Anniversary of the Birth of M. M. Bogolyubov, page 61, Lviv, Ukraine, July 3-6 2019.
24. P. Sarkanych and M. Krasnytska. Critical behaviour of the Ising model with invisible states on a scale-free network. In 45th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, page 32, Online, September 14-16 2020.
25. B. Berche, M. Dudka, R. Folk, Yu. Holovatch, R. Kenna, M. Krasnytska, O. Mryglod, P. Sarkanych, and J. Sznajd. Middle European Cooperation in Statistical Physics: a historical overview. In 45th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, page 20, Online, September 14-16 2020.
26. M. Krasnytska and P. Sarkanych. Potts model with invisible states: critical behaviour on a scale-free network. In 46th International Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO46), page 103, Online, May 11-13 2021.
27. М. Красницька and Ю. Головач. Модель Ізінга зі змінною довжиною спіна на безмасштабній мережі. In XXI Всеукраїнська школа-семінар і Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, page 18, Львів, Україна, Жовтень 11-12 2021.
28. M. Krasnytska and P. Sarkanych. Potts model with invisible states on a scale-free network. In 13th Workshop on Current Problems in Physics, page 11, Lviv, Ukraine, October 26-27 2021.
29. M. Krasnytska. Ising model with varying spin strength on a scale-free network: scaling functions and critical amplitudes ratios. In 47th International Conference 37 of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO47), Online, June 12-16 2022.
30. M. Krasnytska. Degree vs strength: an interplay of power laws for the Ising model on networks. In Statistical Physics and Low-Dimensional Systems – 2022, Pont-à-Mousson, France, May 11-13 2022.
31. M. Dudka, M. Krasnytska, J. Ruiz-Lorenzo, and Yu. Holovatch. On the criticality of structurally disordered magnets. In DPG Meetings 2023, Dresden, Germany, March 20-24

2023. DY 49.2.

32. M. Krasnytska and P. Sarkanych. Potts model with invisible states on a scale-free network. In DPG Meetings 2023, Dresden, Germany, March 20-24 2023. DY 45.15.

33. M. Krasnytska, Yu. Holovatch, B. Berche, and R. Kenna. Ising model with variable spin/agent strengths on graphs. In DPG Meetings 2023, Dresden, Germany, March 20-24 2023. DY 45.15.

34. M. Krasnytska, P. Sarkanych, B. Berche, Yu. Holovatch, and R. Kenna. Potts model with invisible states, old and new. In 48th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO48), page 57, Star'a Lesn'a, Slovakia, May 22-26 2023.

35. M. Krasnytska. Potts model with invisible states: changeover to the percolation transition. In SigmaPhi2023 Conference, Chania-Crete, Greece, July 10-14 2023.

36. М. Красницька, П. Сарканич, Б. Берш, Ю. Головач, and Р. Кенна. Модель Поттса з невидимими станами: огляд. In XXIII Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, page 16, Львів, Україна, Жовтень 26-27 2023.

37. Mariana Krasnytska, Petro Sarkanych, Yuriy Holovatch, Bertrand Berche, and Ralph Kenna. Invisible states Potts model. In Bogolyubov Kyiv Conference Problems of Theoretical and Mathematical Physics, page 40, Kyiv, Ukraine, September 24-26 2024.

38. Ю. Гончар, М. Красницька, Б. Берш, Ю. Головач, and Р. Кенна. Ефективна критична поведінка в моделі Блюме-Капеля на повному графі. In XXIV Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, page 35, Львів, Україна, Жовтень 24-25 2024.

4.7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Результати досліджень було представлено на таких конференціях: MECO41: 42-nd International Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Lyon, France, 2017); Різdv'яні дискусії на кафедрі теоретичної фізики Львівського національного університету ім. І. Франка (2018, 2019); MECO43: 43-rd International Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Krak'ow, Poland, 2018); International 11th Workshop on Current Problems in Physics (Lviv, Ukraine, 2018); IX Scientific Conference "Selected issues of astronomy and astrophysics" (Lviv, Ukraine, 2018); 5-th Conference on Statistical Physics: Modern Trends & Applications (Lviv, Ukraine, 2019); MECO45: 45-th International Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Hungary, online, 2020); MECO46: 46-th International Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Latvia, online, 2021); 13th Workshop on Current Problems in Physics (Lviv, 2021); Всеукраїнська школа-семінар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, ІФКС НАН України, Львів

(2018, 2021, 2023); MECO47: 47-th International Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Sicily, Italy, 2022); Statistical Physics and Low-Dimensional Systems (Abbaye des Prémontrés – Pont-à-Mousson, France, 2022); PG Meetings 2023 (Dresden, Germany, 2023); MECO48: 48th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Stará Lesná, Slovakia, 2023); SigmaPhi2023 Conference (Chania-Crete, Greece, 2023); Bogolyubov Kyiv Conference “Problems of Theoretical and Mathematical Physics” (Kyiv, Ukraine, 2024); а також на семінарах Групи статистичної фізики Університету Естремадури (Бадахос, Іспанія), Групи статистичної фізики Університету Лотарингії (Нансі, Франція), Відділу конденсованої речовини Інституту низьких температур та досліджень структури (Вроцлав, Польща), Інституту теоретичної біології, Університету Гумбольдта в Берліні (Берлін, Німеччина), семінарах Інституту фізики конденсованих систем НАН України (Львів) та семінарах “Статистичної фізики складних систем” ІФКС НАН України.

4.8. Наукове значення використаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів в програмі навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Застосування теорії колективної поведінки охоплює різні галузі: аналіз поширення інформації, динаміку формування громадської думки у соціальних мережах; задачі перколяції — дослідження стійкості до атак, поширення епідемій; оптимізаційні алгоритми, як-от пошук найкоротшого шляху; явища самоорганізації у біологічних системах тощо.

Розробка нових спінових моделей для дослідження колективної поведінки на складних мережах мотивована прагненням поглибити розуміння складних систем і явищ впорядкування, виходячи за межі традиційних підходів. Так, наприклад, нещодавно була запропонована модифікація моделі Ізінга (див. [5,8]), яка зберігає її бінарну природу, але послаблює обмеження щодо фіксованої довжини спіна на кожному вузлі. Основною метою цієї моделі є дослідження критичної поведінки на різних типах графів, що дозволяє аналізувати колективні явища у складних мережах. Особливу увагу приділено вивченню взаємодії між індивідуальними характеристиками спінів та глобальними топологічними властивостями графа. Впровадження індивідуальної сили спіна в модель дозволяє більш адекватно описати складну природу соціальних мереж і водночас знайти практичне застосування у маркетингу, політиці та теорії ігор. Як приклад міждисциплінарного застосування моделі можна розглядати нейронауку. Відомо, що когнітивні процеси залежать від структурної зв'язності мозку, а нейронна взаємодія визначається складною взаємозалежністю геометрії та топології мозкових мереж.

Інше узагальнення моделі статистичної фізики — модель Поттса з "невидимими" станами — була розроблена для пояснення розбіжностей між теоретичними прогнозами та експериментальними спостереженнями критичної поведінки систем зі спонтанно порушеною Z_3 -симетрією, де спостерігаються фазові переходи першого роду. Це суперечить стандартним передбаченням для 2D моделі Поттса, яка для $q \leq 4$ передбачає фазові переходи другого роду. Модель з "невидимими" станами привернула значну увагу завдяки своїй здатності регулювати

інтенсивність та рід фазових переходів шляхом зміни кількості невидимих станів, зберігаючи такі глобальні характеристики, як вимірність простору, діапазон взаємодії та симетрію. Гнучкість у регулюванні балансу енергії та ентропії робить цю модель потужним інструментом для вивчення критичних явищ у різних за структурою складних системах (див. огляд, наприклад, [10]). Дослідження цієї моделі на графах (див. [1,4,9,10]) є особливо важливим через її здатність описувати структури, характерні для багатьох природних і штучних систем, таких як соціальні, нейронні або технологічні мережі. Різні властивості графів, як-от їхня топологія, масштабованість або складність зв'язків, безпосередньо впливають на колективну поведінку системи та її критичні властивості. Зокрема, використання графів дозволяє моделювати взаємодії між вузлами з різною міцністю зв'язків та враховувати нерівномірний розподіл станів, що надає моделі універсальності для застосування в різних галузях — починаючи від фізики до теорії ігор і когнітивних наук.

4.9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства, або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

Модель Поттса з невидимими станами, запропонована для пояснення розбіжностей між теорією та експериментами в 2D-системах із Z_3 -симетрією, таких як $\text{Bi}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}(\text{NO}_3)$, дозволяє налаштовувати інтенсивність та рід фазового переходу, зберігаючи вимірність і симетрію. Було показано, що невидимі стани перетворюють перехід у моделі перколяції зв'язків на фазовий перехід першого роду. Концепція невидимих станів має застосування в теорії ігор («нейтральні стратегії») і оптимізації («невидимі флуктуації»).

Узагальнена модель Ізінга зі змінною довжиною спінів дозволяє краще зрозуміти критичну поведінку у складних системах та мережах, враховуючи як індивідуальні властивості (сила спіна), так і глобальну топологію (структуру мережі). Модель може бути застосована для аналізу задач соціальної динаміки, таких як формування думок та маркетингові стратегії, завдяки здатності моделювати складні взаємодії. У нейронауці спінові моделі допомагають вивчати нейронні мережі в мозку, де змінна сила вузлів відображає різницю у функціонуванні та взаємодії нейронів. Аналіз універсальних характеристик (критичних показників, скейлінгових функцій і відношень критичних амплітуд) дозволяє передбачати поведінку систем поблизу критичних точок, що сприяє розробці й оптимізації магнітних матеріалів, макромолекулярних структур та інших складних систем.

Застосований новий підхід до проблеми впливу структурного безладу на магнітні фазові переходи дозволяє розширити коло можливих матеріалів із властивостями структурно-неоднорідних магнетиків. Традиційні дослідження безладу в 3D-моделі Ізінга зазвичай зосереджуються на замороженому безладі з немагнітними домішками у вузлах ґратки. Запропонована модифікація моделі Ізінга зі змінними довжинами спінів моделює безлад для суміші двох ізінгоподібних магнетиків (суміші зі спінами двох різних довжин). Такий підхід дозволяє дослідити вплив структурного безладу без врахування немагнітної компоненти. Також у перспективі планується досліджувати більш складні матеріали для різної кількості магнітних

компонент, їх концентрацій та законів розподілу.

Результати аналізу мережі співавторства між містами України на базі «Журналу Фізичних Досліджень» (ЖФД) дозволяють редакційній колегії оцінювати динаміку співпраці з авторами та виявляти тенденції у публікаційній активності, розробляти стратегії залучення нових авторів, а також підтримувати зв'язки з тими, хто раніше співпрацював із журналом.

4.10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація має логічну структуру. Дисертаційна робота складається із вступу, розділу з оглядом літературних джерел, що стосуються тематики дисертації, шести розділів основної частини, у яких викладені результати досліджень здобувача, загальних висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Стиль та мова дисертації не викликають суттєвих зауважень.

Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладання відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України.

У ході обговорення дисертації до здобувача не було висунуто жодних зауважень щодо суті самої роботи.

4.11. Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за якою вона представлена до захисту

Дисертація є самостійною науково-дослідною роботою. Робота є актуальною і виконана на високому науковому рівні. Автор має ґрунтовну теоретичну підготовку й необхідні професійні знання. Робота відповідає спеціальності 01.04.02 – “теоретична фізика”.

5. З урахуванням вищезазначеного, та за результатами фахового семінару зі спеціальності 104 – “Фізика і астрономія” Інституту фізики конденсованих систем НАН України, встановили:

5. 1. Дисертаційна робота Мар'яни Богданівни КРАСНИЦЬКОЇ на тему “Колективна поведінка на складних мережах: фундаментальні аспекти та застосування” є завершеною науковою працею, у якій розв'язані актуальні наукові завдання: 1) дослідження фазових переходів для моделі Поттса з невидимими станами на повному графі та на безмастбній мережі; 2) дослідження впорядкування, побудова фазової діаграми для моделі Ізінга зі змінною довжиною спіна на графах різної топології; 3) пошук скейлінгових функцій моделі Ізінга зі змінною довжиною спіна на графах різної топології; 4) пошук функціонального представлення вільної енергії моделі Ізінга з випадковою довжиною спіна; 5) дослідження впливу структурного безладу на магнітне впорядкування, чисельні симуляції для структурно-невпорядкованої 3D моделі Ізінга зі спінами двох довжин; 6) аналіз нулів статистичної суми у площині комплексних значень фізичних параметрів для моделі Блюма-Капеля на повному графі; 7) кількісний аналіз мережі співавторства ЖФД; 8) аналіз динаміки росту семантичної мережі на прикладі мережі концепцій препринтів ArXiv.

Ці результати відповідають спеціальності 01.04.02 – “теоретична фізика” та мають важливе значення для галузі 10 – “природничі науки”.

5. 2. Матеріали дисертації М.Б. Красницької повністю висвітлено у 28 наукових публікаціях, з них 14 статей включено до міжнародних наукометричних баз.

5. 3. Дисертація М.Б. Красницької відповідає вимогам постанови КМУ від 24 липня 2013 р. № 567 “Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів”, наказів МОН України № 1112 від 17.10.2012 р. “Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” та № 40 від 12.01.2017 р. “Про затвердження вимог до оформлення дисертації”.

5. 4. З урахуванням високого фахового рівня М.Б. Красницької, дисертаційна робота “Колективна поведінка на складних мережах: фундаментальні аспекти та застосування” є завершеним науковим дослідженням і рекомендується для подання до розгляду та захисту на спеціалізованій вченій раді.

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук,

М.П. КОЗЛОВСЬКИЙ

доктор фізико-математичних наук,

М.А. ШПОТ

доктор фізико-математичних наук,

Я.М. ІЛЬНИЦЬКИЙ