

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПУБЛІЧНОГО ФАХОВОГО ОБГОВОРЕННЯ

*циклу наукових праць, що планується до висування на присудження
Премії Верховної Ради України імені Ігоря Юхновського*

СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА СКЛАДНИХ СИСТЕМ: ВІД СПІНОВИХ МОДЕЛЕЙ ТА СТРУКТУРНОГО БЕЗЛАДУ ДО КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ

Автори

Красницька Мар'яна Богданівна — доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики конденсованих систем імені І. Р. Юхновського Національної академії наук України.

Сарканич Петро Васильович — кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник Інституту фізики конденсованих систем імені І. Р. Юхновського Національної академії наук України.

Анотація

Формалізм статистичної фізики є природним інструментом дослідження складних систем, оскільки дозволяє встановлювати зв'язок між мікроскопічними взаємодіями та емерджентною колективною поведінкою. Особливий інтерес становлять критичні явища, за яких незначна зміна параметрів системи може спричинити появу якісно нових макроскопічних властивостей а також істотне зростання чутливості до зміни зовнішніх впливів. Такі властивості притаманні не лише фізичним системам, але й біологічним, соціальним та іншим системам із великою кількістю взаємодіючих елементів. Це відкриває можливості для застосування спінових моделей далеко за межами традиційного опису магнітних явищ.

Цикл наукових праць присвячено дослідженню впливу топології взаємодій, структурного безладу, ентропійних чинників та індивідуальної неоднорідності елементів на критичну й колективну поведінку складних систем. Особливу увагу приділено двом взаємопов'язаним механізмам формування такої поведінки: зміні структури взаємодій між елементами та модифікації простору доступних мікростанів і їхніх статистичних ваг. Для дослідження цих механізмів використано аналітичні методи статистичної фізики, теорію середнього поля, методи ренормалізаційної групи, чисельне моделювання та аналіз нулів статистичної суми.

У межах дослідження спінових моделей встановлено, як топологія складних мереж та неоднорідність взаємодіючих елементів впливають на характер фазових переходів і класи універсальності. Зокрема, для моделі Поттса з невидимими станами на безмасштабних мережах досліджено конкуренцію ентропійних ефектів і топологічної неоднорідності, що визначає структуру фазової діаграми та характер критичної поведінки. Для моделі Ізінга зі змінною величиною спінів отримано скейлінгові функції й універсальні відношення критичних амплітуд. Показано також, що структурний безлад у сумішах магнетиків може приводити до виникнення класу універсальності випадково розбавленої тривимірної моделі Ізінга навіть за відсутності немагнітних домішок.

Окрему увагу приділено зміні роду фазових переходів і скінченнорозмірним ефектам. За допомогою аналізу нулів статистичної суми досліджено критичну й трикритичну поведінку моделі Блюма–Капеля, а також зміну роду фазового переходу у двовимірній моделі Поттса зі збільшенням кількості взаємодіючих сусідів. Продемонстровано, що цей метод дозволяє отримувати надійні оцінки критичних характеристик навіть для систем порівняно невеликого розміру та досліджувати перехід від ефективної до асимптотичної критичної поведінки.

Іншим важливим напрямом циклу є дослідження колективного прийняття рішень у системах взаємодіючих агентів. Використання спінових змінних для опису індивідуальних станів та ефективних гамільтоніанів для врахування соціальних взаємодій дозволило застосувати методи статистичної фізики до аналізу колективної поведінки. Досліджено вплив індивідуальних упереджень, нелінійності взаємодій, флуктуацій та мережевої топології на формування

колективного стану. Показано, що навіть у системах із простою топологією взаємодій можуть виникати складні фазові діаграми, неперервні та стрибкоподібні переходи. Встановлено, що топологія мережі та характер міжагентних взаємодій істотно впливають на сприйнятливості системи до внутрішніх і зовнішніх збурень, відкриваючи можливості для регулювання її колективної чутливості.

Отримані результати мають як фундаментальне, так і потенційне прикладне значення. Фундаментальна складова циклу полягає у поглибленні розуміння впливу топології взаємодій, структурного безладу, ентропійних чинників та флуктуацій на критичну й колективну поведінку складних систем різної природи. Водночас результати дослідження моделей колективного прийняття рішень відкривають перспективи практичного застосування, зокрема для розроблення підходів до адаптації колективних систем до змін зовнішніх умов і внутрішніх параметрів шляхом модифікації структури взаємодій та механізмів соціального впливу. Таким чином, цикл робіт не лише розширює фундаментальні уявлення про механізми самоорганізації та колективної поведінки, але й створює теоретичне підґрунтя для керування чутливістю й адаптивними властивостями складних систем.

Ключові слова

Статистична фізика, складні системи, фазові переходи, критичні явища, моделі Поттса та Ізінга, структурний безлад, складні мережі, колективне прийняття рішень.

Резюме конкурсної роботи

Конкурсна робота присвячена фундаментальним закономірностям критичних явищ, фазових переходів і колективної поведінки у складних статистичних системах. Її основу становлять результати досліджень, опубліковані у провідних міжнародних наукових виданнях у 2023–2026 роках, які поєднують методи статистичної фізики, теорії фазових переходів і фізики складних мереж.

Перший напрям охоплює спінові моделі та вплив структурного безладу на критичну поведінку. На прикладі моделей Поттса з невидимими станами досліджено, як додаткові внутрішні стани та топологія безмасштабної мережі впливають на характер фазового переходу. Аналіз моделей Ізінга зі змінною величиною спіну, розбавлених магнітних систем і сумішей магнітів дає змогу з'ясувати роль неоднорідностей та безладу у формуванні універсальної критичної поведінки. Використання масштабних функцій, критичних амплітудних співвідношень і нулів статистичної суми, зокрема для моделі Блюма-Капеля, розширює інструментарій аналізу фазових переходів і допомагає розрізняти їхні типи. Окремо вивчено умови зміни порядку фазового переходу в двовимірній моделі Поттса.

Другий напрям присвячений колективному прийняттю рішень у складних мережевих системах. На основі моделей статистичної фізики досліджено, як індивідуальні упередження, флуктуації, неоднорідність учасників і топологія мережі впливають на формування консенсусу. Поєднання алгоритмічного опису з гамільтоновим підходом створює спільну концептуальну основу для аналізу переходу від індивідуальних рішень до узгодженої колективної поведінки. Показано важливість урахування структури взаємодій і чутливості системи для розуміння складної динаміки, що виникає навіть за простих локальних правил.

Наукова значущість роботи полягає у виявленні та систематизації механізмів, через які мікроскопічні властивості елементів, безлад і мережеві взаємодії визначають макроскопічну поведінку систем. Отримані результати поглиблюють розуміння універсальності та неуніверсальних ефектів поблизу критичних точок і розвивають статистико-фізичний підхід до дослідження складних систем — від магнітних матеріалів до моделей колективної поведінки. Вони створюють теоретичне підґрунтя для подальшого аналізу систем, у яких взаємодія багатьох компонентів породжує нові колективні властивості.

Актуальність роботи

Дослідження складних систем є одним із найперспективніших напрямів сучасної міждисциплінарної фізики. Застосування методів статистичної фізики дозволяє описати появу макроскопічних впорядкованих станів, фазових переходів і критичної поведінки у системах різної природи — від магнетиків та складних мереж до соціально-біологічних. Робота присвячена розробці узагальненого теоретичного підходу до опису фазових переходів у складних статистичних системах та моделюванню колективної поведінки і процесів прийняття рішень.

Основні наукові результати

Цикл праць охоплює два взаємопов'язані блоки дослідження:

1. Критичні явища і фазові переходи у складних статистичних системах. Досліджено вплив топології складних мереж, структурного безладу та невидимих станів на фазові переходи. Зокрема, розраховано критичні показники та термодинамічні функції для моделі Поттса з невидимими станами та моделі Ізінга на безмасштабних мережах. Досліджено ефекти ефективної та асимптотичної критичності в структурно безладних магнетиках, нулі статистичної суми моделі Блюма–Капеля, а також зміну роду фазового переходу в двовимірній моделі Поттса з еквівалентними сусідами.

2. Колективна поведінка і прийняття рішень у складних мережевих системах. На основі статистико-фізичного формалізму (Гамільтоніанів) розроблено мікроскопічні моделі біологічного та соціального консенсусу. Проаналізовано вплив індивідуальних упереджень (bias), флуктуацій, гетерогенності та топології зв'язків на фазові переходи між станами хаосу та узгодженої поведінки групових агентів.

Практичне та теоретичне значення

Результати поглиблюють фундаментальні уявлення про універсальність критичних явищ у безладних та мережевих середовищах, а також надають математичний апарат для прогнозування самоорганізації у складних соціально-технічних та біологічних системах.

Апробація та публікації

Основні результати опубліковано у 10 наукових працях у провідних міжнародних рецензованих журналах, що індексуються у базі Scopus (серед яких публікації категорії Q1 — 2, Q2 — 4, Q3 — 1, Q4 — 3).

Перелік публікацій із кількістю цитувань

№	Повний бібліографічний опис публікації	Web of Science	Scopus	Google Scholar
1	P. Sarkanych, M. Krasnytska. Potts model with invisible states on a scale-free network. Condensed Matter Physics, 26(1), 13507 (2023). DOI: 10.5488/CMP.26.13507.	3	3	5
2	M. Krasnytska, P. Sarkanych, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna. Potts Model with Invisible States: A Review. European Physical Journal Special Topics, 232, 1681–1691 (2023). DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-00843-3.	13	14	13
3	M. Dudka, M. Krasnytska, J. J. Ruiz-Lorenzo, Yu. Holovatch. Effective and asymptotic criticality of structurally disordered magnets. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 575, 170718 (2023). DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170718.	2	2	4
4	M. Krasnytska. Ising model with varying spin strength on a scale-free network: scaling functions and critical amplitude ratios. Condensed Matter Physics, 27(3), 33603 (2024). DOI: 10.5488/CMP.27.33603.	2	1	3
5	J. J. Ruiz-Lorenzo, M. Dudka, M. Krasnytska, Yu. Holovatch. Emergence of the three-dimensional diluted Ising model universality class in a mixture of two magnets. Physical Review E, 111, 024127 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevE.111.024127.	0	1	3
6	Y. Honchar, M. Krasnytska, B. Berche, Yu. Holovatch, R. Kenna. Partition function zeros for the Blume–Capel model on a complete graph. Low Temperature Physics, 51, 567–577 (2025). DOI: 10.1063/10.0036500.	5	5	7
7	P. Sarkanych. Change in the order of a phase transition in the two-dimensional Potts model with equivalent neighbors. Physical Review E, 113, 014108 (2026). DOI: 10.1103/tl56-9vyr.	0	0	1
8	P. Sarkanych, M. Krasnytska, L. Gómez-Nava, P. Romanczuk, Yu. Holovatch. Individual bias and fluctuations in collective decision making: from algorithms to Hamiltonians. Physical Biology, 20, 045005 (2023). DOI: 10.1088/1478-3975/acd6ce.	3	2	4
9	P. Sarkanych, Y. Sevinchan, M. Krasnytska, P. Romanczuk, Yu. Holovatch. Consensus decision making on a complete graph: complex behaviour from simple assumptions. Condensed Matter Physics, 27(3), 33801 (2024). DOI: 10.5488/CMP.27.33801.	2	2	2
10	Y. Sevinchan, P. Sarkanych, A. Tenenbaum, Yu. Holovatch, P. Romanczuk. Collective decision-making with heterogeneous biases: Role of network topology and susceptibility. Physical Review Research, 7, 013286 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevResearch.7.013286.	3	3	5