

ВІДГУК  
офіційного опонента  
на дисертацію Бондаренка Артема Васильовича  
“Нелінійна динаміка сильно зв'язаної пари магнітних вихорів”  
представлену на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за  
спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота А.В. Бондаренка присвячена дослідженням динамічних та статичних властивостей взаємодіючих магнітних вихорів. Вихори є одним з найпростіших топологічних збуджень у магнітних системах. Внаслідок своєї структурної стійкості вони розглядаються як реальні кандидати у різноманітних пристроях запису інформації. Також вони є цікавими об'єктами досліджень з точки зору фундаментальної фізики магнітних систем. Дотепер основну увагу науковці приділяли властивостями одиничних вихорів, проте в останній час активно розвиваються дослідження систем двох або більше взаємодіючих вихорів. Однією з причин таких досліджень є новий підхід до кодування інформації. Якщо за допомогою одиничних вихорів це кодування відбувається через топологічні інваріанти вихора, то для пар вихорів використовується їхнє просторове розташування. На даний момент надзвичайно важливим є з'ясування стійкості системи двох вихорів з різними полярностями та хіральностями що знаходяться під впливом зовнішніх постійних та змінних полів а також стохастичних збурень. Саме цьому і присвячена дисертаційна робота А.В. Бондаренка, що демонструє її актуальність.

Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку літератури що містить 97 найменування. Нижче я проаналізує кожен розділ роботи.

У вступному розділі наведено основні характеристики дисертації, сформульовано мету роботи та методи досліджень.

В першому розділі детально описано результати попередніх досліджень в даній області, зроблено низку важливих визначень. Зокрема детально обговорено рівняння Ландау-Ліфшиця та його різні випадки. Пояснено походження рівняння Тіле, дисипативний доданок Гільберта та методи чисельного моделювання цього рівняння. Хочу підкреслити важливість цього розділу, оскільки його наявність дуже полегшує розуміння наступних частин роботи, де викладені оригінальні результати.

Другий розділ присвячений дослідженню нелінійних коливань в системі двох взаємодіючих вихорів з паралельними поляризаціями ядер що знаходяться під впливом зовнішнього циркулярно-поляризованого магнітного поля. В лінійному наближенні існують дві коливні моди руху пари вихорів: ротаційна, коли вихори

обертаються в протифазі навколо центру мас та гіраційна, коли вони прецесують навколо центру мас без розділення. Опис динаміки здійснювався за допомогою рівнянь Тіля, а потенціал взаємодії між вихорами був суттєво нелінійним. Було побудовано резонансну криву (залежність амплітуди вимушених коливань від частоти накачки) і продемонстровано хороше якісне співпадіння з експериментальними даними. Знайдено новий ефект – ізольований низькочастотний резонанс який характерний для систем з нелінійною дисипацією, проте в даному випадку в рівнянні дисипативний член лінійний. Також отримано новий коливальний режим у вигляді гібридної моди, що поєднує в собі властивості гіраційної та ротаційної мод. Це принципово нелінійний режим взаємодії цих двох мод.

В третьому розділі досліджена проблема власної бістабільності системи двох вихорів. Ця бістабільність означає що система може перебувати або у зв'язаному стані, або у розірваному стані. Зв'язаний стан є енергетично більш вигідним, проте ці два стани розділяє енергетичний бар'єр. Такі системи є чутливими до випадкових збурень, оскільки таке збурення рано чи пізно перекине систему з одного стану в інший. Вони є об'єктом серйозного інтересу науковців починаючи з класичної роботи Крамерса в 30-их роках минулого століття. Тому дослідження впливу теплового шуму на бістабільну систему двох вихорів є надзвичайно актуальними. Здобувач здійснив чисельні моделювання рівняння Тіле з стохастичним доданком (білим дельта-корельованим шумом) і встановив, як деформується фазовий портрет системи під впливом цього шуму. Було розраховано швидкості перемикання для температур порядку кімнатної як функції зовнішнього магнітного поля. Отримано резонансні залежності на яких для певного значення поля швидкості перемикання між станами є максимальними. Ці залежності узгоджуються з експериментальними даними.

Також досліджено перемикання станів при збудженні вихрової пари короткими осцилюючими імпульсами та розраховано залежність ймовірності розриву пари від тривалості імпульсу. Заслуговує на увагу дослідження режиму динамічного хаосу в даній системі. Такий режим може виникати в системі за певного співвідношення частоти та амплітуди періодичної накачки. Існування хаотичної динаміки підтверджено розрахунками показників Ляпунова, побудовану діаграму існування на площині параметрів “частота накачки-амплітуда”, де зображене як регулярні так і хаотичні режими динаміки. Сліди хаотичної динаміки було спостережено на експериментальних вимірюваннях розподілу часів перемикання.

Важливим наслідком проведених досліджень є демонстрація можливості керування зв'язаним станом ядер за допомогою коротких імпульсів невеликої амплітуди тривалістю в сотні піксекунд.

Будь-який штучно зроблений зразок має просторові дефекти. Не є виключенням в даному випадку і магнітні частинки, в яких і розглядаються пари взаємодіючих вихорів. Четвертий розділ дисертації присвячений дослідженю

впливу просторової неоднорідності на динамічні та статичні властивості пари двох вихорів. Здобувачем розглядалися просторові неоднорідності типу центрів пінінгу, які в свою чергу можуть з'являтися внаслідок неідеальності поверхні інтерфейсу між різними шарами композитної наночастинки. Вивчалася поведінка пари вихорів з паралельними поляризаціями та антипаралельними хіральностями. Основним результатом цього розділу є встановлення факту високої чутливості пари вихорів до наявності центрів пінінгу у порівнянні з одиничним вихором. Зокрема зазначу розраховані залежності переходу пінінг-депінінг як функцію зовнішньої накачки.

В останньому розділі у п'яти пунктах перелічені основні результати роботи. Висновки сформульовано чітко і компактно, вони логічно випливають з матеріалів дисертаційної роботи.

Підсумовуючи, підкреслю новизну та актуальність отриманих автором результатів. В дисертації описано великий об'єм проведених здобувачем робіт, який підтверджує можливість використання пар взаємодіючих магнітних вихорів як елементів пам'яті для обчислювальних пристройів.

До дисертаційної роботи варто зробити деякі зауваження. На мій погляд, робота має ряд наступних недоліків:

- 1) На Рис. 2.4. наведене порівняння чисельних та експериментальних даних щодо резонансу ротаційних коливань в системі пари вихорів. Рисунок (а) відповідає чисельним даним. Проте вісь абсцис наводиться в розмірних змінних (Гц), а вісь ординат і параметри магнітного поля – в безрозмірних. Слід було або наводити всю інформацію у безрозмірних змінних, або, якщо це можливо, перейти в розмірні.
- 2) Формула (2.17) доволі тривіальна і такі речі не слід роз'яснювати в кандидатській дисертації.
- 3) В підрозділі 3.3 досліджувалась динаміка системи пари вихорів під впливом випадкових сил. Зокрема розраховувалась швидкість перемикань між двома станами бістабільної системи. Слід зазначити, що для розв'язку таких задач існує аналітичний апарат у вигляді рівняння Фоккера-Планка для функції густини ймовірності. Вважаю недоліком роботи те що автор працював лише з чисельними методами і не скористався цим математичним апаратом.
- 4) Рис. 3.5 демонструє резонансну залежність швидкості перемикання станів від амплітуди зовнішнього магнітного поля. Дане явище нагадує загальновідомий ефект резонансної активації [Resonant activation over a fluctuating barrier, C. R. Doering and J. C. Gadoua, Phys. Rev. Lett. 69, 2318, 1992], коли швидкість стохастично-стимульованого переходу між метастабільними станами залежить резонансним чином від частоти додаткового осцилюючого збурення. Хоча у зазначеному графіку такої частоти немає, певні аналогії з резонансною активацією напрошується. На жаль, автор не спробував обговорити це питання докладніше.

5) При дослідженні явища динамічного хаосу в підрозділі 3.5 чітко не визначено, якою саме була функціональна залежність зовнішньої накачки від часу.

Також зазначу на деякі елементи неохайноті в оформленні роботи, зокрема на ст. 97, третій рядок знизу, бачимо посилання на [compton2010], замість номеру статті.

Зазначені недоліки не знижують загального високого рівня виконаної роботи. Характеризуючи дисертацію в цілому, треба визнати, що вона є закінченою науковою працею, має актуальність, теоретичну і практичну цінність. Достовірність отриманих у роботі результатів забезпечується використанням загальновизнаного апарату теоретичних досліджень магнітних систем та методів чисельного моделювання, а також узгодженням отриманих висновків з експериментальними даними та результатами інших авторів.

Результати дисертації опубліковані у п'яти статтях у провідних світових фахових журналах з високими іmpakt-факторами. Матеріали дисертації були представлені на п'яти міжнародних конференціях та опубліковані у вигляді тез в збірниках матеріалів. Робота виконувалась в рамках чотирьох відомчих тем Інституту магнетизму НАН та МОН України, що підтверджує її практичне значення. Зміст основних положень автореферату дисертації ідентичний змісту основних положень дисертації.

Вважаю, що за всіма формальними і фактичними показниками робота “Нелінійна динаміка сильно зв’язаної пари магнітних вихорів” відповідає всім вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України, є закінченою науковою працею яка дає внесок у теорію магнітної динаміки низьковимірних систем та містить практичні результати необхідні для побудови нових пристрійв реєстрації інформації. Автор дисертаційної роботи А. В. Бондаренко заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Провідний науковий співробітник відділу  
нелінійної фізики конденсованого стану  
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова  
НАН України,  
старший дослідник  
доктор фізико-математичних наук

Я. О. Золотарюк

Підпис доктора фізико-математичних наук  
Я. О. Золотарюка засвідчує,  
Т.в.о. вченого секретаря  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М.М. Боголюбова  
кандидат фізико-математичних наук

I.O. Стародуб

