

Відгук офіційного опонента

на дисертацію **Болясової Ольги Олександрівни**

“Квантові динамічні ефекти у двокомпонентних системах – антиферромагнетиках і двозонних надпровідниках”,

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

У сучасному світі важливість інформаційних та телекомунікацій технологій і, відповідно, необхідність розвитку їх елементної бази є очевидними. Дослідники в усьому світі шукають різноманітні шляхи подальшого удосконалення або створення принципово нової бази цих технологій. У тому числі значна увага дослідників приділяється магнітовпорядкованим матеріалам та надпровідникам, що призвело до формування дослідницьких галузей спітроніки, магنونіки та надпровідникової електроніки. Раніше ці галузі розвивались окремо і пропонували різні підходи до створення нової обчислювальної техніки. Однак нещодавні відкриття продемонстрували дуже цікаві і перспективні властивості гібридних структур на основі магнітовпорядкованих матеріалів та надпровідників, такі як різке, у декілька разів, підвищення резонансних частот магнітодинаміки у гетероструктурах феромагнетик-надпровідник, стабілізація топологічно нетривіальних магнітних текстур за рахунок взаємодії з надпровідником, динамічну взаємодію вихорів Абрикосова зі спіновими хвилями, що була використана для створення рухомих магнетонних кристалів, а також потенційна можливість реалізації спин-триплетної надпровідності у таких гетероструктурах. Ці та інші явища зробили надпровідну магнетоніку окремою перспективною галуззю, як з точки зору створення високоефективних класичних обчислювальних систем, так і з точки зору розвитку квантових технологій, де поєднання надпровідників та магнетиків є природнім, однак не простим.

Одним із критичних питань для створення гібридних магнітно-надпровідних систем є розробка ефективних методів керування магнетиками та їх збудженнями. Справді, існуючі методи можуть бути складно інтегровними з надпровідниками. Так, прикладання великих магнітних полів може порушувати надпровідний стан, а використання ефекту спінового трансферу та спінового ефекту Холла може виявитись неможливим через необхідність прикладання великих густин струмів, що, в свою чергу, можуть зруйнувати надпровідність як напряму, так і через завелике тепловиділення у магнетіку, який знаходиться у нормальному (не надпровідному) стані. Найкращою альтернативою видається використання електричних полів. Також підвищення частот магнітної динаміки є безумовно бажаним для створення більш

швидкодійних систем. Щодо надпровідної складової, то важливими є підвищення критичної температури надпровідника та глибоке розуміння процесів, що відбуваються на границях надпровідника з магнетиком або іншим нормальним металом.

Таким чином дослідження О. О. Болясової відповідають одному з найсучасніших напрямків фізики твердого тіла і, безумовно, є **актуальними**. Варто зазначити, що розглянуті у дисертації питання є важливими не тільки для створення у середньо- чи довгостроковій перспективі гібридних магнітно-надпровідникових систем, а й для істотного прогресу у класичній магнетоніці, зокрема з точки зору створення більш швидкодійних та енергоефективних елементів цифрових та аналогових систем. Окрім спільної галузі перспективного застосування дослідження, представлені в дисертації, об'єднані також і квантовою природою всіх ефектів, а саме: надпровідності, ефекту Ааронова-Кашера та повздовжніх флуктуації намагніченості за нульової температури.

У рамках дисертаційної роботи О. О. Болясовою отримано ряд **нових та оригінальних наукових результатів**. Так, вперше продемонстровано наявність двох енергетичних щілин у надпровіднику $\text{Mo}_x\text{Re}_{1-x}$ з $x \approx 0.5$, та домінування внеску від зон, розділених меншою щілиною, у диференційну провідність контактів $\text{Ag}/\text{Mo}_x\text{Re}_{1-x}$; систематизовано внески різних віртуальних процесів у повздовжню сприйнятливість двопідграткового антиферромагнетика, у тому числі досліджена поведінка цих внесків як при наближенні до нульової температури, так і при наближенні до температури Нееля.

Серед усіх результатів найбільш цікавим та перспективним виглядає група результатів щодо контролю антиферромагнітної динаміки електричним полем за допомогою ефекту Ааронова-Кашера. Окрім малих паразитних втрат, що притаманно всім магнітоелектричним методам контролю динамікою намагніченості, ефект Ааронова-Кашера, як слідує з отриманих результатів, демонструє високу ефективність такого контролю у сенсі досяжних ефективних полів чи/та зсуву спектру спінових хвильових збуджень. Зокрема, продемонстровано можливість зміни частот спінових хвиль на десятки ГГц при прикладанні електричного поля менше за 5 МВ/м, що виглядає досяжним для сучасних експериментальних систем. З цієї точки зору електричний контроль спінових хвиль за допомогою ефекту Ааронова-Кашера в антиферромагнетиках виглядає набагато більш ефективним ніж такий самий контроль у ферромагнітних діелектриках, де експерименти дозволили спостерігати набіг фази менше 0.01 рад/мм, чого, безумовно, замало для практичних застосувань. Крім того, електричне поле знімає виродження між правосторонньою та лівосторонньою модами спінових хвиль

антиферромагнетику і, таким чином, потенційно може дозволити реалізувати різноманітні ефекти, пов'язані з інтерференцією колективних мод, такі як періодичний обмін енергією та інші.

Не можна не відмітити велике різноманіття теоретичних методів, які застосовувались при проведенні дисертаційного дослідження. Здобувачка опанувала і успішно застосувала такі непрості методи теоретичної фізики як діаграма техніка, формалізм Блондера-Тінкхема-Клапвійка, на додачу до більш звичних методів послідовних наближень, знаходження власних хвиль системи, нелінійної регресії та інших – це свідчить про високу кваліфікацію здобувачки як фізика-теоретика.

Результати дисертаційної роботи **опубліковані** у 6-и статтях у періодичних наукових журналах, які всі індексуються у наукометричних базах Scopus та Web of Science; одна зі статей опублікована у закордонному виданні, що має перший квартиль Q1 згідно зі Scimago Journal & Country Rank. Додатково результати висвітлені у 3-х публікаціях у неперіодичних виданнях, що мають doi- та індексуються міжнародними наукометричними базами. Основні результати дисертації повністю висвітлені у публікаціях здобувачки. Також результати дисертаційної роботи пройшли належну апробацію аж на 15 конференціях, у тому числі закордонних — такий пристойний рівень апробації зустрічається нечасто.

У тексті дисертації **відсутні прояви плагіату** та академічної недоброчесності.

Автореферат достатньо повно висвітлює основні результати дисертації.

До дисертаційної роботи є низка **зауважень**:

1. В оглядовому розділі при обґрунтуванні актуальності неодноразово згадується запис інформації, до якого ні сама робота, ні галузь магнетіки в цілому практично не мають стосунку. Основне питання магнетіки – це обробка інформації та сигналів. При описі поточного стану розвитку CMOS технології використані недостатньо нові літературні дані, 2015 р. (робота [4]) – при поточних темпах розвитку CMOS технології такі дані вже є застарілими. Також опис актуальності у вступі до дисертації є занадто стислим.
2. У підрозділі 2.6 при порівнянні теоретичних результатів з експериментом не наведено жодних числових значень та/або графічних залежностей. Дуже складно вважати надане порівняння таким, що підтверджує теоретичні дані. І загалом, у розділі 2 бракує ілюстрацій отриманих залежностей, зокрема, спектрів повздовжніх коливань та окремих внесків у спектр.

3. При розрахунку довжин згасання спінових хвиль у розділі 3 не враховано знак групової швидкості хвиль. Це призводить до хибного враження на Рис. 3.6, що правостороння мода або не існує при малих хвильових числах, або має від'ємне значення Λ .
4. Найбільше питань викликають результати, представлені на Рис. 3.9-3.10. По-перше, необхідно зазначити, що у розділі 4 при розгляді схожої системи жодних особливостей у спектрі немає, що мало б навести на думку про можливу помилку, адже, якщо обидва підходи (розділу 3 і 4) правильні, вони мають давати однаковий результат. Фактично, представлені провали спектру є неправильною інтерпретацією математичних розрахунків (правильно проведених), а саме вони описують не біжучі хвилі, а локалізовані нерезонансні збудження під спектром. Справді, навіть у найпростішому випадку обмінного спектру феромагнетика $\omega_k = \omega_0 + Dk^2$ при врахуванні дисипації $\omega_k \rightarrow (1 + i\alpha)\omega_k$ можна отримати розв'язок під спектром:

$$k = k' + ik'' \approx \pm \frac{1}{\sqrt{D}} \left(\sqrt{\frac{\Delta\omega^2 + \alpha^2\omega_k^2}{2} - \Delta\omega} + i\sqrt{\Delta\omega} \right),$$

де $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_k$ є відстанню від дна спектру. Хоча дисипація призводить до ненульової дійсної частини розв'язку k' , $|k'| \ll |k''|$, тобто розв'язок описує експоненційно локалізований стан із невеликою модуляцією. Говорити про “групову швидкість” поширення такого стану некоректно.

5. З Рис. 4.7 слідує, що різниця часу релаксації право- та лівополяризованих магнонів збільшується зі збільшенням міжпідграткового затухання α_c . Водночас, на Рис. 4.5 найбільша різниця показана на панелі (в), яка відповідає найменшому значенню $\alpha_c = 0.0005$ серед побудованих. Необхідно пояснити цю суперечність.
6. Теоретичний опис експериментальних залежностей диференційної провідності контактів (Рис. 5.5, 5.6, 5.9) супроводжується визначенням (підгонкою) семи параметрів. Доцільно було б описати процедуру такого багатопараметричного регресійного аналізу, а також похибку визначення параметрів системи.
7. При описі практичного значення результатів розділу 5 вказано, що “двозонні сплави Mo-Re можуть стати базисною платформою для досліджень нових квантових ефектів і водночас мають великий потенціал для практичного застосування в надпровідній електроніці”, а у висновках до розділу вказано, що “встановлено, що наявність кількох конденсатів куперівських пар із різними параметрами порядку і слабким джозефсонівським зв'язком між

ними відкриває можливості для вивчення нових квантово-когерентних станів”. Ці твердження важко пов’язати із безпосередніми результатами роботи.

8. У роботі трапляються описки, наприклад, “повний закон збереження спіну” (с. 45), “двомагнітні процеси” (с. 57), пропущена певна кількість знаків пунктуації.

Ці зауваження, однак, не впливають на новизну та достовірність ключових висновків дисертаційної роботи. Достовірність ключових результатів забезпечується використанням математично коректних та багаторазово апробованих теоретичних методів дослідження динаміки намагніченості та аналізу надпровідних точкових контактів.

У підсумку, дисертаційна робота «Квантові динамічні ефекти у двокомпонентних системах – антиферомагнетиках і двозонних надпровідниках» відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12, 13 **“Порядку присудження наукових ступенів”**, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами), за оформленням – відповідає **“Вимогам до оформлення дисертації”**, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 (зі змінами). Публікації, в яких висвітлено основні результати дисертації, задовольняють вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 17 жовтня 2012 року № 1112 **“Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук”**. Тож вважаю, що авторка дисертації Болясова Ольга Олександрівна заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Заступник директора з наукової роботи

Інституту магнетизму ім. В. Г. Бар’яхтара НАН України,

доктор фіз.-мат. наук, старший дослідник

“18” вересня 2025р.



Роман ВЕРБА