

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу А. М. Шутовського  
**“Ефекти фазової когерентності у тунельних надпровідних  
контактах на основі однозонних та двозонних надпровідників,**  
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-  
математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота А. М. Шутовського присвячена дослідженню одного з найбільш характерних ефектів теорії надпровідності – стаціонарному ефекту Джозефсона, який явно й незаперечно демонструє квантове підґрунтя макроскопічних твердотільних об'єктів, у цьому випадку, надпровідників. А саме, знімається виродження по фазі надпровідного параметра впорядкування (макроскопічної хвильової функції), притаманне масивним надпровідним зразкам. Головною характеристикою стаціонарного ефекту є залежність струму  $I$  від різниці фаз  $\phi$  між надпровідними берегами переходу, який у багатьох випадках не зводиться до канонічної синусоїдної залежності, знайденої ще самим Джозефсоном для тунелювання крізь діелектричний прошарок.

Дослідження залежності  $I(\phi)$  викликає великий інтерес з точки зору фундаментальної науки, оскільки дає можливість «промацати» надпровідні властивості електродів та характер тунельних явищ у шаруватих структурах. З іншого боку, переходи Джозефсона та електричні кола, створені на їх основі, широко використовуються в технології, метрології, медицині. Тому знання цих залежностей може допомогти у відомих застосуваннях та започаткувати нові. Слід узяти до уваги, що промисловість та дослідницькі групи навчилися виготовляти переходи з різним ступенем прозорості щодо тунелювання куперівських пар. Це є стимулом до теоретичного вивчення когерентних ефектів для переходів, крізь які проходять струми, великі у порівнянні зі слабкими струмами в більш традиційних переходах. Таким чином, дисертаційна робота А. М. Шутовського є актуальною.

Зокрема, в ній для проміжку температур, близькому до критичної, розрахунок струмових станів було виконано в самоузгоджений спосіб, без накладання на параметр впорядкування певної модельної просторової поведінки. Такий опис дозволяє довести розрахунки до кінцевого результату, що й було зроблено.

В роботі також були зроблені узагальнення на подвійні тунельні переходи та двозонну структуру надпровідного параметра впорядкування, що також додало актуальності, адже такі об'єкти спостерігаються, або, принаймні, експериментальні групи заявляють про відповідні спостереження. Зокрема, розглянуті переходи на основі двозонних надпровідників, вивчення яких припадає на останні роки після відкриття надпровідності в дибориді магнію, де різні експерименти свідчать на користь існування



двох енергетичних щілин в спектрі квазічастинок. Пошук дво- три- та більшої зонності стало модною справою, хоча здебільшого згодом така інтерпретація спростовувалась. Тому вважаю, що теорію розвивати треба, але при порівнянні з експериментом (як правило, чесним і змістовним) теоретик має бути обережним. Приклад афери зі  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  з його нібито триплетною надпровідністю має слугувати уроком. Як там як, але про багатозонність надпровідного параметра впорядкування (багатозонність електронного спектра в нормальному стані є тривіальним фактом, який не викликає жодних заперечень) твердять і щодо залізовмісним надпровідників. Якщо такі твердження існують, то вони вимагають підтвердження дослідженнями різного ґатунку, які здатні зондувати не тільки амплітуду, але й фазу параметра (параметрів?) впорядкування. Фазочутливі методики тут мають стати в нагоді. Звісно, це стосується й ефекту Джозефсона. Відтак і теорія цього ефекту має бути розроблена.

Метою дисертаційної роботи Шутовського було дослідження особливостей струм-фазової залежності у надпровідних переходах із тунельним типом провідності на основі однозонних та двозонних надпровідників. Розглядалась як область температур,  $T$ , далеких від критичної,  $T_c$ , (для цього випадку застосовувалась модель з кусково-сталім параметром впорядкування), так і область  $T$ , близьких до критичної, де обчислення виконувались з урахуванням умови самоузгодженості для параметра впорядкування.

Для температур, близьких до  $T_c$ , головним завданням є вивчення просторової поведінки параметра впорядкування. І тут слід зазначити ті моменти, які є новими в даному контексті та приводять дисертанта до одержання нових результатів. Отже, при знаходженні просторової поведінки параметра впорядкування автор враховує три чинники, що формують цю поведінку – просторову неоднорідність, наявність нормальних домішок, та розпаровуючу дію струму. Ці чинники розглядались у колі проблем, що розглядаються в дисертації, але не в достатньому обсязі та не сукупно. Натомість, у дисертації показано, що в околі межі надпровідника з плівкою діелектрика параметр впорядкування має описуватись лінійним інтегральним рівнянням, а в глибині надпровідника з цією метою використовується рівняння Гінзбурга-Ландау. Зрощування розв'язків дозволяє отримати граничну умову для рівняння Гінзбурга-Ландау. Маючи ефективний спосіб знаходження граничної умови для рівняння Гінзбурга-Ландау, в дисертаційній роботі досліджено залежність струму від різниці фаз у надпровідних контактах типу SIS за наявності немагнітних домішок довільної концентрації. В результаті одержано нову аналітичну формулу для залежності струму від різниці фаз, чинну для широкого інтервалу значень коефіцієнта проходження електронів  $D$  та довільної концентрації немагнітних домішок. Помітною особливістю цієї формули є явна несинусоїдальність залежності струму від різниці фаз, на відміну від  $I(\varphi)$ , характерної для таких переходів без урахування ефектів розпаровування та при  $D \ll 1$ . Показано, що зі



збільшенням коефіцієнта проходження електронів значення фази для максимуму струму зміщується в область  $\varphi < \pi/2$ .

Для дослідження впливу складного характеру залежності струму від фази на динаміку флаксонів (fluxons) у довгих джозефсонівських переходах у дисертації запропоноване модифіковане рівняння синус-Гордона. На основі аналізу цього рівняння зроблено висновок, що зі збільшенням  $D$  магнітне поле більш рівномірно розподіляється по області флаксона.

Використовуючи метод функцій Гріна, для яких використано процедуру згладження їх просторової поведінки на довжинах порядку атомних розмірів, і одержані так звані квазікласичні рівняння в  $t$ -представленні, в дисертації досліджено рівноважні струмові стани в надпровідних переходах типу SIS'IS. Основним результатом цього дослідження є залежність  $I(\varphi)$  справедлива для довільної товщини проміжного прошарку та широкого інтервалу значень коефіцієнта прозорості переходу. Показано, що критичний струм контакту є осцилюючою функцією товщини  $d$  проміжного прошарку і при певних значеннях  $d$  критичний струм переходу з двома півками діелектрика може переважати критичний струм стандартного SIS переходу. Автор показав, що одержана нова формула узгоджується з результатами, одержаними раніше для частинних випадків.

Метод квазікласичних рівнянь для функцій Гріна в  $t$ -представленні, який виявився ефективним у теорії надпровідних переходів на основі звичайних надпровідників, у дисертації було поширено на тунельні надпровідні переходи на основі двозонних надпровідників. Хоча це й привело до вельми громіздких математичних розрахунків, проте автор з ними успішно впорався та одержав нову аналітичну формулу для  $I(\varphi)$  крізь тунельні надпровідні переходи з двозонними надпровідниками. З аналізу цієї формули випливає, що числове значення струму в переході залежить від симетрії складеного параметра впорядкування: для  $s_{++}$  симетрії критичний струм суттєво переважає критичний струм переходу, що містить надпровідники із  $s_{\pm}$  симетрією. Ця обставина уможлиблює використання вимірювання  $I(\varphi)$  з метою з'ясування симетрії параметра впорядкування в двозонних надпровідниках.

Висновки дисертаційної роботи є новими, отриманими вперше, є важливими як у теоретичному так і практичному аспектах. Дисертаційна робота А. М. Шутовського є завершеною науковою працею, де отримані відповіді на запитання, поставленні як мета дослідження. Сформульований в дисертаційній роботі підхід може використовуватись для розрахунків тунельного струму крізь надпровідні переходи іншого штибу.

Дисертаційна робота має низку недоліків, про які йтиметься нижче. На огріхи граматики звертати увагу не буду, зауваживши лише, що автор грамотний, на відміну від багатьох його ровесників. Деякі хибні твердження повторюються в авторефераті та дисертації. Я зазначу збіги.

1. Стор. 1 автореферату (Стор. 15 дисертації). «Традиційно формі залежності  $j(\varphi)$  не приділяли достатньої уваги та вважали, що» – це не так. Була купа праць, які дисертант чудово знає.

2. Стор. 4-5 автореферату. «Показано, що в методі функціонального інтеграла наближення середнього поля виглядає найприроднішим». Що означає «найприроднішим»?

3. Стор. 17 автореферату. «наближення середнього поля, яке у формалізмі функціонального інтеграла виглядає найбільш природним чином.» Що означає «виглядає найбільш природним чином»?

4. Стор. 20 автореферату. (Стор. 176 дисертації). «Показано, що представлення статистичної суми у вигляді функціонального інтеграла дозволяє сформулювати для двозонного надпровідника наближення середнього поля найбільш природним чином». Хіба це твердження можна вважати висновком? Хоча вживання терміну «природний» у цьому контексті я все одно не розумію.

Далі підуть зауваження лише по дисертації.

1. Стор. 26. «Однак, лише кілька конфігурацій представляють інтерес як для теоретичного вивчення так і для їхнього практичного використання [2,34]». А які конфігурації є нецікавими та чому?

2. Стор. 38. «Якщо ми досліджуємо тунельні надпровідні контакти типу SIS із немагнітними домішками довільної концентрації, то нам варто брати до уваги те, що просторову поведінку параметра впорядкування поблизу границі IS потрібно описувати за допомогою замкненої системи двох лінійних інтегральних рівнянь [32]». Чому так? Чому можна лінеаризувати рівняння Гінзбурга-Ландау? Я розумію, що це взято з підручника, але в дисертації розлого пояснюються менш принципові речі. А тут з'явився дивний пробіл у логіці викладу.

3. Стор. 39. У розділі 2.1 дисертаційної роботи представлені система лінійних інтегральних рівнянь та рівняння Гінзбурга-Ландау, що використовуються для опису просторової поведінки параметра впорядкування. Перед формулою (2.1.6) знаходимо фразу ... «знайдеться така точка  $z$ , у якій усі три рівняння зберігатимуть свою чинність одночасно». Проте, не є до кінця зрозумілим, як автор обирає цю точку (точку зрощування розв'язків).

4. Стор. 40. Помилка в другій формулі з (2.2.1).

5. Зустрічаються випадки використання нумерації формул, на які відсутнє посилання в тексті, наприклад (3.2.5), (3.2.8).

6. Мені дуже бракує порівняння отриманих результатів для SNS контактів з попередніми результатами, скажімо, Кулика-Омелянчука.



7. Чим відрізняються результати для флаксонів від результатів попередників? Адже тільки «в більшій частині цих робіт залежність надпровідного струму  $IS$  від різниці фаз  $\varphi$  є синусоїдною». А щодо меншості, то як? Тобто тут, як і в деяких інших місцях відсутнє порівняння з працями попередників, на яких автор в тексті посилається! Від такого порівняння дисертація би виграла.

Проте, зазначені недоліки не впливають на достовірність, важливість та новизну отриманих у дисертації результатів і не знижують її наукову цінність.

Наукові результати, викладені в дисертаційній роботі опубліковані в шести статтях, доповідались на одинадцяти наукових конференціях, в тому числі міжнародних. Автореферат відповідає змісту дисертації та містить основні її результати.

З усього вище наведеного аналізу дисертації випливає її загальна висока оцінка. Автор одержав нові цікаві та науково обґрунтовані результати в царині теорії слабкої надпровідності. Високий рівень дисертації забезпечено використанням потужних математичних методів, надійністю проведених розрахунків, ясним стилем викладання. Дисертаційна робота А. М. Шутовського відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Доктор фізико-математичних наук,  
головний науковий співробітник  
Інституту фізики НАН України

Габович О. М.

