

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Соболя Олександра Олександровича «Надкритична нестабільність у графені з зарядженими домішками»**, яка подана до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю **01.04.02 – теоретична фізика.**

З початку XXI сторіччя графен постійно привертає до себе увагу науковців всього світу, завдяки своїм унікальним властивостям як з точки зору фундаментальних досліджень так і з точки зору перспективи його застосування в новітній наноелектроніці. Дисертація присвячена теоретичному дослідженню властивостей електронних станів у графені з зарядженими домішками.

В дисертації О.О. Соболя чітко сформульована мета, постановка та розв'язки наступних задач теоретичної фізики:

Розглянуто явище надкритичної нестабільності, умови його виникнення та особливості прояву в системах домішок із зарядами одного та різних знаків. Для кластера з двох однакових домішок встановлено, що існує критична відстань між ними, при наближенні на яку виникає нестабільність.

У потенціалі диполя з двох протилежно заряджених домішок знайдено новий прояв надкритичної нестабільності, коли електрон та дірка народжуються з вакууму в зв'язаних станах з відповідними домішками.

Також досліджено можливість реалізації цього явища у системах, де спектр електронів є виключно дискретним: листі графену обмеженої площі та графені у зовнішньому магнітному полі. Окрім того, враховано вплив поляризаційних ефектів на екранування потенціалу домішок у графені в магнітному полі. Обґрунтовано можливість регулювання ефективного заряду домішки за допомогою напруги затвору.

Дисертація складається з анотації, вступу, літературного огляду і трьох оригінальних розділів, списку літератури, який містить 92 найменування. У вступі було обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, показана наукова та практична цінність отриманих результатів, визначений особистий внесок здобувача, зазначені апробація результатів роботи та структура дисертації.

У першому розділі наведено огляд основних робіт, які стосуються низькоенергетичних електронних властивостей графену в наближенні сильного зв'язку. Описані явища, які впливають квазірелятивістської поведінки електронів у графені, зокрема явище надкритичної нестабільності. Розглянуто низку теоретичних робіт, що описують явище надкритичного атомного колапсу в (3+1)-вимірній КЕД. Також проведено огляд робіт, які стосуються впливу магнітного поля на електронний спектр графену із кулонівськими домішками, наводяться результати експериментів, що свідчать про можливість ефективно регулювати силу потенціалу домішки у магнітному полі за допомогою напруги затвору.

У другому розділі досліджено надкритичну нестабільність у найпростішому кластері з двох однакових заряджених домішок у графені. Заряд кожної з них є докритичним, в той час як сумарний заряд двох домішок (якщо їх розмістити поруч) перевищує критичне значення. Показано, що існує критична відстань між ними, при наближенні на яку система переходить у надкритичний стан, пораховано залежність цієї відстані від заряду домішок, а також визначено енергію та ширину резонансу, який утворюється в нижньому континуумі у надкритичному стані.

У третьому розділі досліджується надкритична нестабільність для квазічастинок у графені зі щілиною в зонному спектрі в потенціалі електричного диполя, утвореного двома протилежно зарядженими домішками. Знайдено новий прояв надкритичної нестабільності, обумовлений спонтанним народженням з вакууму електронно-діркової пари при збільшенні дипольного моменту (відстані між домішками).

У четвертому розділі досліджуються особливості виникнення та можливості реалізації явища надкритичної нестабільності у системах, де існує лише дискретний спектр енергії електронів. До таких систем належать, зокрема, лист графену скінченних розмірів або графен у зовнішньому магнітному полі. Зауважимо, що в таких системах, оскільки енергетичні континууми відсутні, явище надкритичної нестабільності в традиційному сенсі не реалізується. Проте, виникає інший прояв цього явища, який полягає у перегрупуванні енергетичних рівнів електрона при перевищенні зарядом домішки деякого критичного значення.

Ще раз підкреслимо особливо важливі, на мій погляд, **результати**:

1. Встановлено, що критична відстань між двома однаковими домішками зростає при збільшенні їх заряду і при зменшенні ширини квазічастинкової щілини. У граничному випадку безщілинного графену надкритична нестабільність настає при перевищенні

сумарним зарядом критичного значення, незалежно від відстані між домішками. Перехід у надкритичний стан супроводжується виникненням у нижньому континуумі резонансів (аналог добре відомих квазілокальних коливань в динаміці решітки).

2. Для системи з двох різнойменно заряджених домішок у графені зі щільною в зонному спектрі показано, що при поступовому збільшенні відстані між домішками відбувається зміна локалізації хвильової функції електрона, який вийшов з діраківського вакууму, з негативно зарядженої домішки на позитивно заряджену. Це можна інтерпретувати як народження з вакууму пари електрона і дірки, кожен із яких перебуває у зв'язаному стані з відповідною домішкою. Встановлено, що явище можливе лише в системі домішок, заряди яких перевищують певне порогове значення.
3. У системах, де спектр електронів є виключно дискретним, проведено аналіз поведінки енергії та хвильових функцій при поступовому збільшенні заряду домішки. Показано, що надкритична нестабільність виникає при перевищенні зарядом деякого критичного значення. При цьому відбувається збурення хвильових функцій нижнього «квазіконтинууму», яке цілком аналогічне до утворення резонансного стану.
4. Встановлено, що врахування поляризаційних ефектів у магнітному полі значно модифікує потенціал домішки. Екранування сильно залежить від положення хімічного потенціалу, а тому його можна регулювати шляхом прикладання напруги затвору. Показано, що екранування мінімальне, коли хімічний потенціал знаходиться у проміжку між рівнями Ландау, і найбільш ефективно, коли він лежить всередині рівня Ландау. Однак, цей висновок не зовсім однозначний і в своїх зауваженнях я на цьому зупинюся.

Отримані результати свідчать про високий науковий рівень дисертанта, добре знання літератури і взагалі, гарну обізнаність у проблемах, пов'язаних з темою дисертації. Однак, на жаль, дисертація не позбавлена і деяких **недоліків**:

1. Недостатньо обґрунтовано застосовність наближення суцільного середовища, особливо це стосується випадку, коли мова йде про одиничну домішку.
2. При застосуванні варіаційного методу в дисертації використовується лише перше і друге наближення. Оскільки мова не йде про малий параметр, то не зрозуміло, на якій підставі обмежується розгляд тільки цими наближеннями.
3. Найбільш істотне зауваження пов'язане з ситуацією, коли хімічний потенціал потрапляє всередину рівня Ландау. Адже ця ситуація призводить до появи дробового ефекту Холла і порушується наближення невзаємодіючих електронів. Але це зауваження слід сприймати як побажання для подальшої роботи.

Проте вказані недоліки істотно не впливають на наукове і практичне значення проведених досліджень. Робота пройшла апробацію на багатьох міжнародних та всеукраїнських

конференціях, а її результати представлені у 9 роботах (5 із них складають статті в наукових журналах, а 4 – у працях конференцій).

Результати, які представлені в дисертації, повністю і своєчасно опубліковані в провідних міжнародних та українських журналах. Статті здобувача добре відомі в науковому суспільстві.

Вважаю, що за кількістю і якістю отриманих результатів дисертаційна робота Соболя О.О. «Надкритична нестабільність у графені з зарядженими домішками» відповідає вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Соболев Олександр Олександрович, безумовно, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,

провідний науковий співробітник лабораторії чисельних методів

у теоретичній фізиці відділу теоретичної фізики

Фізико-технічного інституту низьких температур

імені Б.І. Веркіна НАН України

Є. С. Сиркін



Сиркіна Є. С.

ВІДЧУЮ
Ученый секретар ФТИНТ
Ім. Б.І. Веркіна НАН України
кандидат фізико-математичних наук

Самішевський О.М.