

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Соболя Олександра Олександровича**

**“Надкритична нестабільність у графені з зарядженими домішками”**

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Одним з цікавих напрямків фундаментальних досліджень графену стало так зване використання графену у якості "настільного прискорювача". Звісно, це пов'язано з тим, що рух електронів провідності в графені в низькоенергетичному наближенні описується 2+1 вимірним рівнянням Вейля, або Дірака, якщо розглядається графен зі щільною у спектрі. Це надає можливість відтворювати в твердотільних експериментах аналогі деяких квантових релятивістських явищ, які раніше не спостерігалися навіть у фізиці елементарних частинок. Серед них клейнівське тунелювання, надкритичний атомний колапс. Останнє явище має дуже цікаву та довгу історію, яка починається з того моменту, коли було розв'язано трьохвимірне рівняння Дірака для задачі про атом водню. З розв'язків цього рівняння випливало, що енергія найнижчого рівня  $1S_{1/2}$  стає уявною, якщо заряд ядра  $Z$  більший за 137. Над цією задачею працювало багато теоретиків, таких, як Померанчук, Смородинський, Зельдович та інші, уточнювалися значення критичного заряду ядра з врахуванням скінченності його розмірів. Певні підсумки цієї роботи були зроблені у відомому огляді, надрукованому в "Успіхах Фізичних наук" в 1971 році. Робилися експерименти по створенню у зіткненнях надважких ядер, які б дозволили спостерігати явище атомного колапсу, які на жаль, не мали успіху.

Ситуація змінилася з відкриттям графену. Головним є те, що для нього аналогом сталої тонкої структури в КЕД грає постійна  $e^2/(\hbar v_F)$   $\sim 2.2$ . Вона така велика, оскільки роль швидкості світла в графені грає швидкість Фермі -  $v_F$ , яка у 300 разів менша за швидкість світла. Звісно, це значення зменшується через те, що графен лежить на підкладці. Але головним є те, що значення критичного заряду це вже одиниці. Звісно, це вже ніяка не ядерна фізика, і мова йде не про створення електрон-позитронних пар. Роль ядер вже можуть грати заряджені домішки, наприклад, з атомів кальцію. Їх можна переміщувати по поверхні графену за допомогою скануючого тунельного мікроскопу. Відповідні експерименти були зроблені групою Майкла Кроммі (Michael Crommie) у 2013 році. Експериментальне підтвердження полягає у спостереженні змін у локальній густині електронних станів.

Порівняння теорії з експериментом досить складне, оскільки маємо не один точковий заряд, а декілька домішок.

Дисертація Соболя О.О. присвячена пошуку умов виникнення явища надкритичної нестабільності у системах заряджених домішок у графені та вивчення його проявів.

Перший розділ дисертації має оглядовий характер. Викладена історія питання та її сучасний стан.

У наступному, другому, розділі досліджується надкритична нестабільність у найпростішому кластері з двох однакових заряджених домішок у графені. Заряд кожної з них є докритичним, в той час як сумарний заряд двох однакових домішок  $2Ze$  перевищує критичне значення. При фіксованому безрозмірному заряді  $\zeta$  домішки надкритичний режим настає при певній відстані між домішками  $R_{cr}$ . Розглянута задача є дуже складною з технічної точки зору, оскільки для рівняння Дірака неможливо розділити змінні. Залежність критичної відстані від заряду домішок, отримані методом зшивання асимптот та за допомогою методу Канторовича з одним та двома доданками у варіаційній підстановці. Також отримана залежність критичної відстані від ширини енергетичної щілини в спектрі квазічастинкових збуджень.

У третьому розділі розглядається задача, яка нагадує другий розділ, але заряди домішок мають протилежний знак, тобто створюють електричний диполь. Вивчено надкритичну нестабільність для квазічастинок у графені зі щілиною в спектрі. Особливість такої ситуації полягає у тому, що система зберігає симетрію відносно зарядового спряження, а тому спектр електрона залишається симетричним відносно нуля. При зміні відстані між домішками електрон на заповненому (нижньому) рівні мігрує з від'ємно зарядженого центра на додатньо заряджений. Ефективно це виглядає так, ніби електрон, що вийшов з діраківського вакууму, локалізується на додатній домішці, екрануючи її, а біля від'ємної домішки локалізується дірка. Це нагадує ситуацію із задачею про надважке ядро, коли народжується пара електрона і дірки. Проте в задачі про графен кожен із них перебуває у зв'язаному стані з відповідною домішкою, частково екрануючи її. Якщо заряди домішок замалі, щоб рівні електрона і дірки разом перекрили інтервал енергії  $2\Delta$ , таких явищ не спостерігається. Тому надкритична нестабільність у полі диполя має пороговий характер.

У четвертому розділі досліджується 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. У таких системах явище надкритичного атомного колапсу не може виникати в традиційному розумінні, коли зв'язаний стан електрона занурюється до нижнього континууму, тому

що континууми відсутні. Натомість, при перевищенні зарядом домішки деякого критичного значення відбувається перегрупування енергетичних рівнів електрона, яке якісно схоже до утворення резонансу.

Слід особливо відзначити, що три роботи здобувача опубліковано у такому високорейтинговому журналі, як *Physical Review B*, одна робота опублікована у *Europhysics Letters*, а також те, що він має одну статтю опубліковану одноосібно. Все це свідчить про належну апробацію основних положень роботи. Автореферат повністю відображає зміст дисертації.

Разом з тим, можна висловити до дисертації наступні зауваження.

1. Загальним зауваженням є те, що найкращою величиною для порівняння теорії з експериментом була б локальна густина станів. Проте у Розділі 2 обрахована тільки критична відстань. У Розділі 3 обраховано квадрат модуля хвильової функції і тільки в Розділі 4 дійсно присутня інтегральна густина станів.

2. В Розділі 2 кулонівський потенціал (2.2) взаємодії з домішками залишається сингулярним, хоча в кінці розділу можна знайти обговорення екранування. В Розділі 3, де розглядається дуже схожа задача, рівняння (3.2), одразу обговорюється що, домішки розташовані на деякій відстані від графеного листа. Все це відображає прогрес автора у розумінні проблематики. Але при написанні дисертації всі ці моменти було б варто одразу обговорити в одному місці більш когерентним чином.

3. На останок, на с. 37 вираз "електрон знаходиться біля точки Дірака" мені здається не дуже вдалим.

Проте перелічені зауваження зовсім не мають принципового значення та не впливають на високу оцінку основних результатів дисертації О.О. Соболя. Автором розв'язано цілу низку актуальних задач, а наведені зауваження можуть бути враховані при подальшій роботі автора.

Даючи загальну характеристику дисертації, можна стверджувати, що вона є закінченим науковим дослідженням, виконаним у новому напрямку фізики конденсованих систем. Отримані автором результати мають безсумнівну наукову цінність і сприятимуть подальшому розвитку досліджень у цій області.

Враховуючи актуальність обраної теми, значний обсяг виконаних досліджень, наукову цінність та обґрунтованість отриманих результатів і рівень їхньої апробації, вважаю, що дисертація О. О. Соболя "Надкритична нестабільність у графені з зарядженими домішками" цілком відповідає всім вимогам МОН України щодо кандидатських

дисертацій, а її автор Олександр Олександрович Соболев, без сумніву, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,

старший дослідник

завідувач лабораторії сильнокорельованих

низьковимірних систем

Інституту теоретичної фізики

ім. М.М. Боголюбова НАН України

С.Г. Шарапов

Підпис С. Г. Шарапова засвідчує:

Т.в.о. вченого секретаря ІТФ ім. М.М. Боголюбова

НАН України,

кандидат фізико-математичних наук



І. О. Стародуб