

## ВІДГУК

### офіційного опонента

на дисертацію Ключніченка Олександра Вікторовича  
«Індукована дисипативна взаємодія та колективне розсіяння  
в Ленгмюровому гратковому газі»,

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

Дисертаційна робота О. В. Ключніченка присвячена теоретичному дослідженню досить складної задачі про динаміку багатокомпонентних дисипативних систем в тому випадку, коли істотною є взаємодія частинок середовища одна з одною. Тут можна говорити про щільний газ або навіть про стисливу рідину, для визначеності далі використовуємо термін «газ». Розглядається потік газу в системі з малорухомими (фактично, нерухомими) включеннями. Досліджується питання про локальну зміну щільності газу і про дію газу на включення. Дослідження цих питань є актуальним для розвитку нано-фізики, зокрема, фізики нано-суспензій або нано-порошків, але ця задача є одною з найскладніших у фізиці чи механіці. У роботі використана модель граткового газу з умовою, що на одному вузлі решітки може перебувати тільки одна частинка, або частинка газу, або включення. Ця модель є досить спрощеною, але добре відображає основні проблеми, зокрема, врахування сильної короткодіючої взаємодії частинок, яка призводить до ефектів насичення густини. Адекватний вибір нетривіальної моделі і її послідовний аналіз, який включає чисельне моделювання, аналітичне дослідження в довгохвильовому наближенні, а також якісне пояснення результатів свідчать про високу кваліфікацію О. В. Ключніченка як дослідника в галузі теоретичної фізики.

Розглянемо роботу і отримані в ній результати докладніше. Перше ключове питання в даній роботі – ефекти колективного розсіяння потоку частинок газу на домішці (або системі домішок) в режимі ефекту блокади в газі і колективне формування неоднорідностей (слідів). Важливим є також дослідження властивостей індукованої нерівноважної взаємодії домішок (включень) при русі в середовищі. Отримані результати можуть бути застосовані до широкого кола фізичних систем. Основні результати роботи отримані в рамках планової наукової тематики відділу теоретичної фізики Інституту фізики НАН України.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. У *вступі* обґрунтовується актуальність теми дисертаційного дослідження; формулюється мета і основні завдання роботи; описується запропонований підхід до вирішення поставлених завдань; характеризується ступінь новизни отриманих результатів та їх апробація; дається короткий виклад змісту дисертації.

Аналіз особливостей структури збурення щільності газу, яке проявляється у вигляді сліду при розсіянні потоку частинок на окремій статичній домішці при врахуванні короткодіючого відштовхування частинок, досліджений в *першому розділі* роботи. В цьому розділі описана кінетика стрибкового транспорту в рамках моделі багатокомпонентного ленгмюрівського граткового газу – базової моделі, на основі якої проводиться подальший розгляд. Обговорюються можливі недоліки і обмеження використовуваних підходів. Домішка в гратковому газі розглядається як граничний випадок двокомпонентного газу з нерухомою другою компонентою. Знайдена структура «сліду», що виникає при обтіканні домішки. Тут мені найбільше сподобався результат про зміну характеру сліду при переході рівноважної концентрації газу через критичне значення (ефект концентраційної інверсії сліду). Результат чисельного аналізу підтверджено аналітичним розрахунком. Це дозволило отримати асимптоти-

чні вирази для загасання сліду далеко від домішки і описати, в лінійному наближенні, концентраційну інверсію сліду.

У *другому розділі* розглядається поведінка дисипативних сил, які діють між включеннями в залежності від концентрації газу, величини зовнішнього поля і взаємного розташування включень. Сформульований в першому розділі аналітичний підхід застосовується до опису властивостей індукованої дисипативної взаємодії між домішками в потоці газу. Ці сили можуть відігравати важливу роль для практичних застосувань нано-технологіях, оскільки їх просторовий масштаб вимірюється нано-метрами. Для цієї взаємодії порушується третій закон Ньютона, так що можна говорити про неньютонівську взаємодію частинок. Проводиться порівняння з результатами чисельних розрахунків, що враховують нелінійний ефект блокади в газі. Передбачено ефект перемикання (зміни знаку) дисипативної взаємодії при зміні концентрації.

Результати *третього розділу* отримані, в основному, чисельними розрахунками і стосуються колективного розсіяння потоку частинок на кластерах домішок в режимі, коли суттєво проявляється ефект блокади в газі. Продемонстровано ряд ефектів колективного розсіяння для локалізованої системи домішок в потоці газу. Показано, що розсіяння, при тій же кількості домішок в кластері, істотно відрізняється для кластерів з регулярним упорядкуванням розсіювачів і випадково неоднорідним їх розподілом. Показані ефекти посилення розсіяння і ударної хвилі при фрагментації цільного включення на кластер домішок. Розглядається формування спільного збурення щільності і ударних хвиль, які створюються колективно сукупністю розсіювачів при неадіабатичному ввімкненні потоку.

Також показано, що стаціонарний розподіл щільності (профіль сліду) формується як залишкове збурення після проходження ударної хвилі, при цьому формування стаціонарного профілю типу доменної стінки пояснюється ефектом зупинки ударної хвилі. Демонструється можливість генерації кластерами домішок солітоноподібних структур.

У *четвертому розділі* розглядаються індуковані кореляції в повільній підсистемі двокомпонентного ґраткового газу, обумовлені швидкою підсистемою. У квазіодновимірному випадку, використовуючи адіабатичне наближення і наближення однорідних кластерів, показано, що такі кореляції характеризуються від'ємним довгочасовим хвостом, аналогічно тому, як це має місце для так званих гідродинамічних кореляцій між колоїдними частинками в одновимірних каналах, заповнених рідиною. У цьому ж розділі розглядається і інший граничний випадок двокомпонентного ґраткового газу, коли одна з компонент нерухома, що дозволяє змодельовати дифузійний транспорт в неоднорідному середовищі. Показана можливість від'ємного коефіцієнта дифузії. Цей результат має загальний характер і може бути корисним для опису формування нової фази, зокрема, шляхом росту зародків при фазовому переході першого роду. При цьому, в процесі дифузійного розпливання пакета, середньоквадратичне відхилення відображає лише усереднену динаміку стрибкової поведінки фронту пакета, і задовольняє режиму субдифузії.

Як будь-яке значне дослідження, робота не вільна від недоліків. Висловлю наступні зауваження:

- 1) Автор використовує квадратну решітку, хоча для опису ефектів ближнього порядку в щільному газі/рідині більш адекватним було б використання щільної трикутної решітки. Як зміняться результати для такої решітки?
- 2) Під час обговорення результатів розділу 3 автор неодноразово проводить аналогії з ефектами в оптиці. Однак зрозуміло, що в оптиці характер ефекту сильно залежить від спів-

відношення довжини хвилі світла і характерних розмірів неоднорідності системи. Корисно було б відзначити, про які хвилі йдеться, і обговорити, що відіграє роль довжини хвилі в даній задачі.

- 3) В роботі розглянуто випадок двокомпонентного газу з різними рухливостями для двох компонент. При цьому в розділі 1 густина «швидкої» компоненти позначена  $n$ , а «повільної» –  $u$ , в той час як в розділі 4 позначення протилежні,  $u$  для швидкої і  $n$  для повільної. Також незручним є використання протилежних колірних кодів (див., напр., рис. 1.2 і 3.1). Це допустимо в окремих роботах, але небажано в оглядовій роботі типу дисертації.

Зазначені вище зауваження не знижують наукової цінності результатів автора і дисертації в цілому. Матеріали роботи свідчать про високу кваліфікацію здобувача як дослідника. Сформульовані в дисертації висновки і положення достовірні, обґрунтовані і мають високу наукову цінність. Робота написана хорошою мовою і відмінно оформлена. Основні результати були опубліковані в 5 статтях у провідних світових журналах (3 статті в Physical Review E, по одній в ЖЭТФ і European Physical Journal) і добре цитуються, вони доповідалися на багатьох міжнародних конференціях особисто дисертантом. Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою на актуальну тему. Автореферат правильно і повністю відображає зміст дисертації. У мене немає сумнівів, що робота «Індукована дисипативна взаємодія і колективне розсіяння в Ленгмюровому ґратковому газі» відповідає всім вимогам МОН України, що пред'являються до кандидатських дисертацій, а її автор О. В. Ключніченко заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України,  
завідувач лабораторії магнітних матеріалів  
Інституту магнетизму НАН України та МОН України

Б. О. Іванов

Підпис Іванова Бориса Олексійовича засвідчую:

Вчений секретар Інституту магнетизму  
НАН України та МОН України,  
кандидат фізико-математичних наук

А. О. Хребтов