

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Момота Андрія Івановича

«Ефективні взаємодії та флуктуації у запырошеній слабоіонізованій плазмі»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Актуальність теми дисертаційної роботи. Протягом останніх десятиліть у дослідженні плазми як особливого стану речовини виник та інтенсивно розвивається новий напрям пов'язаний з вивченням запырошеної плазми. Запырошена плазма (або складна плазма) – це плазма, яка містить дрібні завислі в ній заряджені частинки конденсованої речовини - порошинки. Такі порошинки часто зустрічаються у космічній плазмі, у лабораторних умовах частинки можуть формуватися у хімічно-активній плазмі або вводитися цілеспрямовано. Плазма, яка застосовується у технологічних процесах, наприклад, при травленні, нанесенні тонких плівок чи виготовленні наночастинок, також є запырошеною. Заряд порошинок мікронних розмірів, зазвичай, складає порядку тисячі чи більше елементарних зарядів, тому порошинки можуть легко утворювати систему із сильним кулонівським зв'язком, значно впливаючи на властивості плазми. В залежності від заряду та концентрації порошинок запырошена плазма може перебувати у газоподібному (у випадку слабого зв'язку), рідинному чи квазікристалічному стані (у випадку сильного зв'язку). Розміри порошинок є досить великими, тому можна спостерігати за рухом окремих порошинок, тобто вивчати процеси у структурах порошинок, такі як фазові переходи і поширення хвиль, на мікроскопічному рівні. Колективна поведінка порошинок визначається ефективною взаємодією між ними, тому актуальною є задача вивчення ефективних потенціалів окремих порошинок і взаємодії між ними. При цьому важливо враховувати як зіткнення електронів та іонів з порошинками, так і зіткнення з нейтральними частинками (запырошена плазма часто є слабоіонізованою), а також можливу наявність зовнішніх полів чи рух порошинки. Тому дисертаційна робота Момота А.І. присвячена вивченню

ефективних взаємодій у запырошеній слабокіонізованій плазмі є безперечно актуальною.

Іншим актуальним питанням, яке розглядається у роботі, є флуктуації та поширення хвиль у запырошеній плазмі. Порошинки є масивними, тому характерна частота їх коливань складає десятки герц, а от характерна частота заряджання порошинки лежить в області плазмової іонної частоти, тому спектри іонно-звукових хвиль суттєво модифікуються у запырошеній плазмі. Також процеси заряджання і пов'язані з цим флуктуації заряду порошинок впливають на спектри флуктуацій електронної густини у плазмі. Оскільки струми заряджання суттєво залежать від зіткнень плазмових частинок з нейтральними, то їх необхідно враховувати при вивченні флуктуацій і хвиль у запырошеній плазмі, що і було зроблено у дисертаційній роботі. Все вищесказане, безумовно свідчить про актуальність обраної теми дисертації.

Слід відзначити, що внаслідок наявності вільних точкових зарядів і сильно заряджених макрочастинок запырошена плазма має деякі спільні риси із зарядженими колоїдними системами. Однак існує принципова різниця між цими обома об'єктами в механізмі зарядження макрочастинок. Тоді як в колоїдних системах заряд колоїда виникає в результаті хімічної взаємодії колоїдної макрочастинок з розчинником і є фіксованим у випадку запырошеної плазми заряд порошинки є результатом адсорбції порошиною електронів та іонів плазми і не є фіксованим. Тому виконані в роботі дослідження ефективних взаємодій макрочастинок із фіксованим зарядом важливі, як для порівняння із запырошеною плазмою, так і мають самостійне значення для теорії заряджених колоїдних систем.

Частина результатів дисертації отримана підчас виконання науково-дослідних робіт в рамках держбюджетних тем та міжнародних проектів у відділі теорії та моделювання плазмових процесів та відділі синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, а також на кафедрі фізики функціональних матеріалів фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Загальна характеристика структури та зміст роботи. Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, переліку праць здобувача, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку.

У **першому розділі**, зокрема, обговорено процеси заряджання порошинок плазмовими струмами та моделі, які використовуються для їх опису. Обговорено неідеальність запыленої плазми і фазові переходи у ній. Представлені основні положення кінетичної теорії звичайної плазми, які використовуються для подальшого опису запыленої плазми. Представлена мікроскопічна теорія запыленої плазми, а саме кінетичне рівняння для мікроскопічної фазової густини, з якого отримується кінетичні рівняння для запыленої плазми.

У **другому розділі** досліджується ефективний потенціал порошинки. Зокрема, для кінетичного опису ефективного електростатичного потенціалу зарядженої порошинки запропонована модель точкових стоків, суть якої полягає в тому, щоб описати ефекти, зумовлені поглинанням плазмових частинок порошиною, ввівши в кінетичне рівняння ефективні сингулярні стоки. Також, у рамках дрейфово-дифузійного наближення досліджено ефективний потенціал у слабоіонізованій плазмі з частими зіткненнями. Щоб врахувати нелінійні ефекти та скінченний розмір порошинки використовувалися числові методи розв'язання задачі. Досліджено вплив постійного магнітного поля на ефективний потенціал порошинки у такій плазмі.

У **третьому розділі** виконано числове дослідження сил взаємодії між двома однаковими зарядженими провідними сферичними частинками, які знаходяться у слабоіонізованому плазмоподібному середовищі. Обчислення проведені для випадку частинок із заданим електричним зарядом (колоїдних частинок), а також для частинок, які заряджаються плазмовими струмами (порошинок).

У **четвертому розділі** в рамках моделі точкових стоків виконані кінетичні розрахунки ефективного потенціалу порошинки для випадку слабоіонізованої плазми у зовнішньому постійному електричному полі. Знайдено силу тертя, яка діє на порошинку і пов'язана з дрейфом іонів у електричному полі. Розглянуто

заряджену провідну сферичну порошок, яка стаціонарно рухається у слабоіонізованій плазмі з частими зіткненнями. В рамках дрейфово-дифузійного наближення обчислена сила тертя, яка діє на порошок.

У **п'ятому розділі** узагальнено кінетичну теорію великомасштабних флуктуацій у слабоіонізованій плазмі на випадок присутності зовнішнього постійного електричного поля. Досліджено поширення іонно-звукових хвиль у такій плазмі. Виконано детальне чисельне дослідження впливу зіткнень і зовнішнього електричного поля на спектри флуктуацій концентрації електронів.

Запропоновано новий підхід до послідовного кінетичного опису великомасштабних флуктуацій у заповненій слабоіонізованій плазмі з урахуванням зіткнень плазмових частинок як з нейтралами, так і з порошками, а також флуктуацій заряду порошинок внаслідок їх заряджання плазмовими струмами. Отримано вираз для функції діелектричного відгуку і на його основі детально вивчено дисперсію і згасання іонно-звукових хвиль у заповненій плазмі. Досліджено вплив порошинок на спектри флуктуацій електронної густини.

Ступінь обґрунтованості наукових положень висновків і рекомендацій, які сформульовані у дисертаційній роботі Момота А.І. є достатньою і базується на коректній постановці задач досліджень, використанні добре апробованих аналітичних та числових методів, всебічному аналізі отриманих результатів і їх порівнянні з раніше відомими. Висновки до розділів і загальні висновки коректно сформульовані і базуються на отриманих у роботі результатах.

Обґрунтованість і достовірність результатів досліджень, які отримані в дисертаційній роботі, підтверджується публікаціями статей у наукових фахових виданнях з фізико-математичних наук, у тому числі 21 статті, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, апробацією на семінарах та наукових конференціях.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій полягає в тому, що вперше:

- 1) розвинута кінетична теорія запыреної плазми, що враховує зіткнення електронів та іонів як з нейтральними частинками, так і з порошинками. Центральним місцем запропонованого підходу є опис поглинання електронів та іонів порошинками шляхом введення ефективних точкових стоків у кінетичні рівняння для плазмових частинок. Розвинута теорія узагальнена на випадок наявності зовнішніх електричних і магнітних полів. На основі запропонованого підходу отримано аналітичні вирази для ефективного потенціалу порошинки;
- 2) чисельно розв'язана задача про ефективний потенціал сферичної порошинки у слабоіонізованій плазмі з частими зіткненнями і запропонований простий аналітичний вираз для апроксимації цього потенціалу. Показано, що розподіл електростатичного потенціалу у слабоіонізованій плазмі з частими зіткненнями поблизу зарядженої сферичної порошинки, що поглинає електрони та іони, може бути описаний суперпозицією потенціалів Кулона та Дебая з масштабною довжиною екранування, що в кілька разів більша за радіус Дебая, що обумовлено суттєвим зменшенням концентрації плазмових частинок біля порошинки через їх поглинання порошинкою;
- 3) досліджено розподіл потенціалу і характер екранування порошинки в слабоіонізованій сильнозіткненій плазмі за наявності зовнішнього магнітного поля. Показано, що в напрямку паралельному зовнішньому магнітному полю ефективний потенціал може мати немонотонну поведінку;
- 4) проведено дослідження сил взаємодії між двома зарядженими сферичними провідними частинками, що знаходяться в слабоіонізованій сильнозіткненій ізотермічній плазмі. Показано, що у випадку частинок з фіксованим зарядом сила взаємодії має дебайвську асимптотику, тоді як у випадку частинок, що заряджаються плазмовими струмами спостерігається кулонівська асимптотика з ефективним зарядом;

- 5) в рамках дрейфово-дифузійного наближення проведено дослідження сили тертя, яка діє на сферичну провідну порошинку, що стаціонарно рухається у слабоіонізованій плазмі з частими зіткненнями і отримано аналітичний вираз, який узгоджується з результатами обчислень. Показано, що поглинання іонів порошинкою може приводити до зміни напрямку сили тертя;
- 6) узагальнено кінетичну теорію великомасштабних флуктуацій у плазмі на випадок присутності зовнішнього електричного поля з врахуванням зіткнень заряджених частинок з нейтральними. Отримано відповідне дисперсійне рівняння і показано, що зовнішнє електричне поле може приводити до нестійкості іонно-звукових хвиль. Виконано дослідження впливу зіткнень і зовнішнього поля на спектри флуктуацій електронної густини. Показано, що поле приводить до аномального наростання інтенсивності флуктуацій;
- 7) в рамках кінетичного підходу досліджено діелектричні властивості запорошеної плазми з врахуванням заряджання порошинок плазмовими струмами та зіткнень плазмових частинок з нейтральними. Показано, що зіткнення плазмових частинок з порошинками, а також флуктуації заряду порошинок є додатковими механізмами дисипації енергії іонно-звукових хвиль і приводять до суттєвого зростання модуля декрименту згасання.

Наукові положення і дослідження, за якими було захищено кандидатську дисертацію, не включено до результатів докторської дисертації.

Повнота викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях. Основні результати дисертації в повній мірі висвітлені у 38 публікаціях (1 монографії, 21 статті у наукових фахових виданнях, які входять до наукометричної бази Scopus, 5 працях і 11 тезах доповідей наукових конференцій). Зокрема, високий рівень досліджень підтверджується публікаціями автора у провідних міжнародних журналах (Physical Review E, Physics of Plasmas) та використанням іншими авторами отриманих дисертантом

результатів (згідно наукометричної бази Scopus статті, які включені у дисертацію, мають ~200 цитувань).

Автореферат повністю відображає основний зміст виконаних досліджень і отриманих результатів дисертації.

Зауваження та дискусійні положення дисертаційного дослідження.

1. В роботі розглядається класична плазма. Це справедливо при досить високих температурах, коли теплова хвиля де Бройля для електронів є достатньо малою і квантовими ефектами можна знехтувати. Мені здається, що це слід би було відмітити на початку роботи.
2. В роботі не достатньо обговорюються межі використовуваних наближень. Так, на початку розділу 2 обговорення екранування проведено у рамках моделі Пуассона-Больцмана, яка по суті відповідає наближенню самоузгодженого поля, вихід за рамки якого потребує врахування кореляційних ефектів. Аналогічна потреба з врахуванням кореляційних ефектів виникає і в кінетичній теорії в рамках рівняння Боголюбова-Балеску-Ленарда, чи апроксимуючого його рівняння Батнагара-Гросса-Крука. Мені здається, що це також слід би було відмітити в оглядовому розділі.
3. В роботі допускається, що температура електронів та іонів плазми є різною у випадку неізотермічної плазми. Але виникає питання наскільки стійкою є така плазма?
4. На сторінці 89, рівняння (2.10) представляється як потенціал Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека, але такий потенціал майже на 20 р. раніше був отриманий Дебаєм і Гюккелем при спробі врахувати розміри центрального іона і в теорії електронів відомий як наближення ДН2.
5. У обчисленнях на основі дрейфово-дифузійного наближення, на великих відстанях від порошинки використовувалась крайова умова $n_{\alpha}(r)_{r \rightarrow \infty} = n_0$. Але ця умова дозволяє порушення умови квазінейтральності плазми.

6. У роботі запропонована модель точкових стоків, але інтенсивність стоку залежить від розміру порошинок. Варто було б детальніше обговорити для порошинок яких розмірів застосовна запропонована модель.
7. У четвертому розділі отримано аналітичний вираз для потенціалу порошинки (4.38), але не виконано його порівняння із іншими аналітичними виразами, які були отримані і детально розглядались у розділі 2.
8. У розділі 3, в якому досліджувалась взаємодія двох макрочастинок, розглядались лише частинки однакового розміру, було б добре дослідити взаємодію частинок різних розмірів і зарядів. Чи має дисертант якісь припущення про те як будуть взаємодіяти різні частинки?
9. На жаль, робота недостатньо вичитана. Враження від роботи понижують наявні описки. Так на стор. 99 написано «Електросатичний» замість «Електростатичний», на стор. 95 написано «ти фактом» замість «тим фактом», на стор. 134 написано «наводити» замість «привести», на стор. 144 «має місці» замість « має місце», на стор. 148 написано « силу взаємодію» замість «силу взаємодії», на стор. 194 написано «Таки» замість «Такий», на стор. 225 «заявляється» замість «з'являється» і т.п. Має також місце повторення формул у різних розділах дисертації, наприклад одна і та ж формула зустрічається під номерами (2.25), (3.20) і (4.81).

Зазначені зауваження не знижують загальну високу оцінку дисертаційного дослідження Момота А.І. і не знижують її наукової цінності. Отримані в ній результати є новими та оригінальними, суттєво розширюють наші уявлення про властивості запорошеної плазми, стимулюють нові дослідження.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота «Ефективні взаємодії та флуктуації у запорошеній слабкоіонізованій плазмі» є закінченою науково-дослідною роботою, в якій розроблений новий підхід до вивчення ефективних потенціалів у слабкоіонізованій плазмі. Отримано нові і науково обґрунтовані результати, які в сукупності є значним досягненням для теорії

ефективних взаємодій та флуктуацій у запырошеній плазмі. За актуальністю, обсягом проведених досліджень, новизною отриманих результатів та рівнем і кількістю публікацій дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій, а її автор, Момот Андрій Іванович, безумовно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальність 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
головний науковий співробітник відділу теорії м'якої речовини
Інституту фізики конденсованих систем НАН України

М.Ф. Головка

«21» листопада 2019 р.

Підпис М.Ф. Головка засвідчую:

Вчений секретар
ІФКС НАН України
канд. фіз-мат. наук



Р.С. Мельник