

## ВІДГУК

офіційного опонента **Маслова Василя Івановича** на дисертаційну роботу **Хелемелі Олексія Володимировича** «Втрати енергії важкої зарядженої частинки в замагніченому електронному газі з анізотропною температурою», подану на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертаційна робота Хелемелі О.В. присвячена теоретичному вивченню взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом з анізотропним розподілом за швидкостями в зовнішньому магнітному полі.

Дослідження процесу взаємодії заряджених частинок в магнітному полі відбувається більш, ніж протягом цілого століття. Незважаючи на велику кількість робіт в цій області, теоретичне вивчення розглядуваного питання залишається актуальним, оскільки сучасні експерименти із фізики пучків розширюють область досліджень і ставлять нові запитання як перед теоретиками, так і експериментаторами. Розширення можливостей методу електронного охолодження пучків важких заряджених частинок дозволить отримувати високо прецизійні пучки іонів. А це в свою чергу відкриває нові горизонти в експериментах на зустрічних пучках.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг роботи - 146 сторінок. Структура роботи логічно відповідає темі дослідження.

**У вступі** автор обґрунтовує актуальність теми, формулює мету і завдання дослідження, формулює наукову новизну результатів, їх наукове і практичне значення, вказує особистий вклад, інформацію про апробацію дисертації і публікації.

**В першому розділі** автор дає огляд робіт, присвячених вивченню взаємодії заряджених частинок, проводить огляд методу електронного охолодження. Описано основні теоретичні підходи: теорія парних зіткнень, діелектрична модель та методи квантової теорії поля, - та досягнення в їх рамках у вивченні впливу температури електронного газу та магнітного поля на енергетичні втрати важкої зарядженої частинки в електронному газі. Перший розділ дає вичерпну картину попередніх досліджень у цій галузі фізики.

**В другому розділі** розглянуто випадок проходження іона в холодному електронному газі в зовнішньому магнітному полі. Показано, що квантово-польовий підхід включає в себе, як частинні випадки, результати, отримані в рамках теорії парних зіткнень та діелектричної моделі. Представлені основні кроки використання квантово-польового методу. Проведені оцінки квантових поправок в задачі електронного охолодження.

**В третьому розділі** досліджується вплив температури на гальмівну здатність електронного газу. В рамках квантово-польового підходу отримано вирази для діелектричної сприйнятливості як у випадку ізотропного, так і анізотропного розподілів електронів за швидкостями. Результати чисельного

розрахунку добре узгоджуються з даними експерименту та отриманими в роботі аналітичними наближеннями.

**В четвертому розділі** автор отримав в рамках квантово-польового підходу вираз для діелектричної сприйнятливості магнітоактивного електронного газу з урахуванням розподілу за швидкостями. Представлені результати розрахунків сили тертя зарядженої частинки в електронному газі. Показано, що у випадку анізотропного розподілу електронів за швидкостями в сильному магнітному полі максимум гальмівної здатності зростає на кілька порядків. Даний ефект є протилежним до випадку ізотропного розподілу, коли максимум зменшується в порівнянні з випадком без магнітного поля.

У **висновках** наведені головні наукові результати, здобуті у дисертації.

**Апробація дисертації.** Основні положення і висновки дисертації повністю відображені у п'яти публікаціях у спеціалізованих наукових журналах, які входять до переліку журналів ДАК МОН України. Дисертант доповідав результати дисертації на міжнародних школах і конференціях, опубліковано 14 тез доповідей.

**Найбільш важливими результатами дисертаційної роботи на мій погляд є наступні:**

1. Використовуючи явний вигляд діелектричної сприйнятливості, чисельно побудовано залежність енергетичних втрат важкої зарядженої частинки від швидкості з врахуванням впливу анізотропної температури електронного газу та зовнішнього однорідного магнітного поля.

2. У випадку відсутності зовнішнього магнітного поля показано, що:

А) при ізотропному розподілі електронів за швидкостями максимум гальмівної здатності зростає пропорційно до зменшення температури електронного газу. Положення максимуму відповідає значенням швидкості зарядженої частинки, яка в  $2^{1/2}$  раз більша за середню теплову швидкість електронів;

Б) при анізотропному розподілі електронів за швидкостями, коли повздовжня температура електронного газу менша на 3 порядки від поперечної, максимум гальмівної здатності в 3 рази перевищує значення при ізотропному розподілі. Положення максимуму гальмівної здатності визначається значенням середньої повздовжньої теплової швидкості електронів, і при її зменшенні зміщується в область менших швидкостей.

3. У випадку сильного зовнішнього магнітного поля, коли повністю подавлений поперечний рух електронів, показано, що:

А) при ізотропному розподілі електронів за швидкостями максимум гальмівної здатності менший в 2,4 рази в порівнянні з випадком без магнітного поля;

Б) при анізотропному розподілі електронів за швидкостями, коли повздовжня температура електронного газу менша на 3 порядки від поперечної,

максимум гальмівної здатності в 300 разів перевищує значення при ізотропному розподілі. Положення максимуму відповідає значенням швидкості зарядженої частинки, яка в  $2^{1/4}$  раз більша за середню теплову повздовжню швидкість електронів.

**Практична значимість** дисертації пов'язана з тим, що отримані результати для втрат енергії враховують вплив температури електронного газу та магнітного поля, а отже можуть бути використані для опису широкого кола задач, зокрема електронного охолодження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно або при його безпосередній участі.

**Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації** обумовлена використанням добре розроблених методів квантової електродинаміки та порівняння нових одержаних результатів з результатами раніше проведених експериментів.

**До недоліків дисертації потрібно віднести наступні:**

1. У розділах 2 та 3 проводиться порівняння результатів, отриманих в рамках діелектричної моделі та квантово-польового підходу і робиться висновок, що квантово-польовий метод є більш загальним, оскільки враховуються всі прицільні параметри і він не потребує процедури обрізання для уникнення розходжень. Результати, отримані в рамках діелектричної моделі, доцільно було доповнити результатами з теорії парних зіткнень для отримання повних втрат енергії іона. А вже доповнені втрати енергії обох підходів порівнювати із результатами квантово-польового методу.
2. У підрозділі 3.3 на рис. 3.4 та 3.5 представлені результати чисельного розрахунку гальмівної здатності електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями. Для наочності необхідно було б зобразити результати, отримані аналітично в пунктах 3.3.3. та 3.3.4. в наближеннях великих і малих швидкостей налітаючого іона, аналогічно до рис. 3.2 у випадку ізотропного розподілу електронів за швидкостями.
3. В роботі проводяться дослідження процесу гальмування важкої зарядженої частинки в електронному газі для параметрів електронного охолодження. Рекомендую авторові звернути увагу на інші експерименти та фізичні процеси, де б можна було використати отримані вже результати, наприклад, термоядерний синтез, атмосфера нейтронних зірок та ін.
4. Технічні зауваження: а) у пунктах 3.3.4, 4.2.4, 4.3.2 в тексті відсутня нумерація підпунктів; б) назва підрозділу 4.2. та основний текст знаходяться на різних сторінках; в) в тексті замість словосполучення «спектр температур» можна було б використовувати «набір температур».
5. В авторефераті друкарська помилка: після другого опонента треба кому поміняти на крапку або прибрати її взагалі.
6. Також на сторінці 2 автореферата друкарська помилка: дві крапки.
7. На сторінці 3, а також в підписі до рис. 3 на сторінці 10, на рис. 5 на сторінці 13 та на 16 автореферату та по дисертації друкарські помилки: в українському варіанті використовується 2.4 замість 2,4.

8. Друкарська помилка на сторінці 7 в рядку 3 знизу та на сторінці 16 в рядку 1 автореферату: не потрібна кома.
9. Друкарська помилка на сторінці 9 автореферату: між формулами (9) та (10) вирази, напевно, не  $T_{e\perp} = m_e v_{e\perp}$ ,  $T_{e\parallel} = m_e v_{e\parallel}$ , а,  $T_{e\perp} = m_e v_{e\perp}^2$ ,  $T_{e\parallel} = m_e v_{e\parallel}^2$ .
10. Друкарська помилка на сторінці 16 пункт 4: не «воздовжньою», а «поздовжньою».
11. Друкарська помилка на сторінці 20: не «по-скільки», а «поскольку».

Однак наведені зауваження не впливають на достовірність і значимість одержаних автором результатів, і не знижують загальну вельми позитивну оцінку дисертації Хелемелі О.В.

Матеріал у дисертації викладено послідовно, всі основні результати обгрунтовані і мають чітке наукове пояснення. У кожному розділі є висновки. Автореферат правильно демонструє зміст і основні положення дисертації.

Дисертаційна робота Хелемелі Олексія Володимировича є закінченою науково-дослідною роботою. На мій погляд здобуті в дисертації результати є важливими для подальшого розвитку фізики пучків та теоретичної фізики. Результати можуть бути використані в дослідженнях, які виконуються в ПФ НАН України, ІТФ НАН України, ННЦ ХФТІ НАН України, Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, у міжнародному проєкті HESR («High Energy Storage Ring») у м. Дармштадт, Німеччина, та інших наукових центрах.

Таким чином, за актуальністю теми дисертації, обсягом досліджень, новизною здобутих результатів я вважаю, що дисертаційна робота «Втрати енергії важкої зарядженої частинки в замагніченому електронному газі з анізотропною температурою» задовольняє вимогам МОН України до кандидатських дисертацій і «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, а її автор, Хелемеля Олексій Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика.

Доктор фізико-математичних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
ННЦ Харківський фізико-технічний  
інститут НАН України

В.І. Маслов

