

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

Хелемеля Олексій Володимирович

*Хелемеля*

УДК 530.145:537.533.9:537.632

**ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ ВАЖКОЇ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ  
В ЗАМАГНІЧЕНОМУ ЕЛЕКТРОННОМУ ГАЗІ  
З АНІЗОТРОПНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ**

01.04.02 - теоретична фізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної фізики НАН України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник, доцент  
**Холодов Роман Іванович**,  
заступник директора з наукової роботи, завідувач  
відділу квантової електродинаміки сильних полів  
Інституту прикладної фізики НАН України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Лисенко Олександр Володимирович**,  
завідувач кафедри прикладної математики  
та моделювання складних систем  
Сумського державного університету МОН України.

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Маслов Василь Іванович**  
провідний науковий співробітник  
ННЦ Харківський фізико-технічний інститут  
НАН України,

Захист відбудеться «11» жовтня 2018 року о 14:00 на засіданні спеціалізованої  
вченої ради К55.250.01 при Інституті прикладної фізики НАН України за  
адресою: 40000, м.Суми, вул. Петропавлівська, 58.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту прикладної фізики  
НАН України.

Автореферат розісланий «\_\_\_\_\_» вересня 2018 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,

кандидат фізико-математичних наук



В.М. Недорешта

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Вивченню процесів, які відбуваються при взаємодії пучків частинок з полями і речовиною, нині приділяється значна увага як в Україні, так і за її межами. Так, зокрема, наукова програма міжнародного мегапроекту FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) — нового унікального прискорювача для досліджень з антипротонами та іонами, що буде побудований міжнародними зусиллями поблизу Дармштадту, Німеччина, — передбачає надання вичерпного і кількісного розуміння адронної матерії, включаючи дослідження фундаментальних симетрій та взаємодій, а також дослідження динаміки багаточастинкових систем з урахуванням колективних ефектів, які відіграють важливу, а часто навіть вирішальну роль на всіх рівнях структури матерії. В рамках проекту FAIR вперше планується побудова накопичувального кільця антипротонів HESR (High Energy Storage Ring) з використанням електронного охолоджувача з пучком релятивістських електронів (5 МеВ/частинку), що дасть змогу досягти рекордних значень світимості в експериментах із зіткнення протонів та антипротонів.

Швидкість протікання електронного охолодження та кінцева температура охолоджених важких заряджених частинок зумовлюються впливом зовнішнього однорідного магнітного поля, яке використовується в електронних охолоджувачах для запобігання розльоту електронів, та розподілом електронів за швидкостями, температурою. Електронне охолодження — високоефективний метод стиснення фазового об'єму пучків важких заряджених частинок, який широко використовується у всьому світі на накопичувальних установках. На сучасному етапі існують кілька теорій, теорія парних зіткнень та діелектрична модель, які використовуються для опису взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом в зовнішньому магнітному полі. Врахування в рамках даних підходів впливу температури електронів, зокрема, її анізотропії, та зовнішнього магнітного поля призводить до виникнення цілого ряду проміжних напівемпіричних параметрів у виразі для енергетичних втрат та необхідності залучення процедур обрізання та зшивки. До того ж, аналітичний вираз для втрат енергії вдається отримати лише в ряді наближень.

В даному дисертаційному дослідженні запропоновано використовувати для опису взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом методи квантової теорії поля. Знайдений методами квантової теорії поля вираз для енергетичних втрат не містить у собі розходжень, а мінімальний та максимальний прицільні параметри визначаються із перших принципів. Нині побудова та розвиток закінченої теорії, яка б дала змогу описувати процес взаємодії іона із замагніченим електронним газом з анізотропним розподілом за швидкостями є дуже актуальною як з наукового погляду, так і з погляду прикладної значущості.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відділі №40 «Квантової електродинаміки сильних полів» Інституту прикладної фізики НАН України і є частиною досліджень,

які проводилися за темами: «Квантово-електродинамічні і колективні процеси в надсильних полях, зокрема при зіткненнях важких іонів та в задачі електронного охолодження» (державний реєстраційний номер 0111U010613, термін виконання 2012-2016 рр.) та «Квантово-польові підходи в задачах зіткнення важких іонів і електронів в електромагнітних полях» (державний реєстраційний номер 0116U005848, термін виконання 2017-2021 рр.) та в рамках меморандуму про співробітництво між Інститутом прикладної фізики НАН України та Дослідницьким центром Julich GmbH, Німеччина (R-R EDV 11.038).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом з анізотропним розподілом за швидкостями в зовнішньому магнітному полі.

Для досягнення цієї мети в дисертації вирішуються наступні завдання:

— визначається явний вигляд діелектричної сприйнятливості з урахуванням ізотропного та анізотропного розподілів електронів за швидкостями та впливу зовнішнього магнітного поля.

— використовуючи явний вигляд діелектричної сприйнятливості, знаходиться залежність енергетичних втрат важкої зарядженої частинки від її швидкості;

— досліджується вплив ізотропної та анізотропної температур електронного газу на енергетичні втрати іона;

— вивчається вплив магнітного поля на гальмівну здатність електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями.

**Об'єктом дослідження** є процес взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом у зовнішньому магнітному полі..

**Предметом дослідження** є вивчення впливу анізотропного розподілу електронів за швидкостями та зовнішнього магнітного поля на енергетичні втрати важкої зарядженої частинки.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використовується математичний апарат квантової теорії поля, фізики плазми, чисельні методи та алгоритми паралельного програмування для багатопроцесорних комп'ютерних систем.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше знайдено аналітичні вирази для дійсної та уявної частин діелектричної сприйнятливості замагніченого електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями в рамках квантово-польового підходу.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

**Практичне значення отриманих результатів.** Здобуті в дисертації аналітичні вирази для дійсної та уявної частин діелектричної сприйнятливості замагніченого електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями в рамках квантово-польового підходу та отримані залежності енергетичних втрат важкої зарядженої частинки від впливу зовнішнього магнітного поля та анізотропної температури є простими для розуміння й аналізу, а отримані результати можуть бути використані для опису широкого кола задач, зокрема для задачі електронного охолодження іонів.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в ІПФ НАН України, ІТФ НАН України, ННЦ “ХФТІ” НАН України, Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), HESR (High Energy Storage Ring), HIRFL-CSR (Cooler Storage Ring of Heavy Ion Research Facility), та інших наукових центрах.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно або при його безпосередній участі. В роботі [1] в рамках діелектричної моделі знайдено втрати енергії для зарядженої частинки у нескінченній замагніченій електронній плазмі. Запропоновано визначати явний вигляд кулонівського логарифму, виходячи з принципу відповідності, що дало змогу не залучати феноменологічного параметра обрізання для зшивки з теорією парних зіткнень. Аналітичні результати підтверджені чисельними розрахунками, проведеними для випадку руху зарядженої частинки під довільним кутом до магнітного поля, довільної напруженості. В роботі [2] аргументовано доцільність використання квантово-польового підходу для опису електронного охолодження. Проаналізовано вплив магнітного поля з врахуванням анізотропного розподілу за швидкостями електронного газу. Проведена оцінка квантових ефектів в

електронному охолодженні. В роботі [3] отримано аналітичні вирази для уявної та дійсної частин діелектричної сприйнятливості електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями в рамках квантово-польового підходу. Чисельно отримана залежність енергетичних втрат іоном в електронному газі для випадків: 1) з ізотропною температурою; 2) з анізотропною температурою, коли іон співнаправлений з пучком електронів. В роботі [4] чисельно отримана залежність енергетичних втрат іоном в електронному газі з анізотропним розподілом за швидкостями для довільних кутів між напрямками руху іона та електронного пучка. В роботі [5] в рамках квантово-польового підходу враховано вплив магнітного поля та температури електронного газу на енергетичні втрати важкої зарядженої частинки. Отримано аналітичні вирази для дійсної та уявної частин діелектричної сприйнятливості електронного газу в зовнішньому однорідному магнітному полі.

З науковим керівником обговорювалися задачі в плані постановки, методів розв'язку, способів обчислення конкретних величин і аналізу отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах теоретичного відділу в Інституті прикладної фізики НАН України, на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях:

- Trans-European School of High Energy Physics, Alushta, Crimea, Ukraine (2011);
- 12-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Network Modeling, Sudak, Crimea, Ukraine (2013);
- Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ (2014-2017);
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Харків (2014, 2016) ;
- Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів, Харків (2016, 2018);
- Multiscale Modeling of Physical Processes in Condensed Matter, Інститут прикладної фізики НАН України, Суми (2014);
- Матеріали міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених. Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики, Суми, Україна (2012, 2016, 2017);

Роботи [1-3] ввійшли до циклу наукових праць «Дослідження взаємодії частинки з електронним замагніченим газом методом квантової теорії поля», що був відзначений щорічною премією Президента України для молодих вчених 2016 року, згідно указу Президента України №509/206 від 17 листопада 2016 року.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 19 наукових роботах, з яких 5 статей опубліковано в спеціалізованих наукових журналах, що

входять до переліку ДАК МОН України, і 14 у вигляді тез доповідей у збірниках наукових праць конференцій.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел. Об'єм дисертації складає 146 сторінок, зокрема, основний текст викладений на 119 сторінках та включає в себе 20 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність вибраної теми, формулюється мета і визначаються основні завдання дослідження, відображається новизна отриманих результатів, їх наукове, практичне значення, зв'язок роботи з науковими програмами і темами, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи, основних публікацій, а також щодо структури дисертації.

В **першому розділі «Втрати енергії зарядженої частинки в електронному газі»** здійснено аналіз сучасного стану досліджуваних проблем. Проведено огляд літератури, який присвячений вивченню взаємодії зарядженої частинки з електронним газом з анізотропним розподілом за швидкостями в зовнішньому магнітному полі в експериментах з електронним охолодженням. Детально проаналізовані роботи, присвячені вивченню процесів гальмування іона в плазмі методами парної теорії, діелектричної (плазмової), квантової теорії поля та чисельними методами. Кванто-польовий підхід включає в себе як частинні випадки і результати парної теорії, і діелектричної моделі. Використання квантово-польового підходу дає нам можливість уникнути процедури, зшивки, оскільки відсутнє розходження при малих та великих прицільних параметрах у визначенні гальмівної здатності електронного газу, характерних для класичних теорії парних зіткнень та плазмової моделі. Квантово-польовий підхід дає можливість дослідити з перших принципів вплив на енергетичні втрати важких заряджених частинок як зовнішнього магнітного поля, так і анізотропного розподілу електронів за швидкостями. Аналітичні результати, отримані в загальноприйнятих наближеннях в рамках квантово-польових методів, потребують доповнення чисельними методами.

У **другому розділі «Квантова теорія поля в задачі електронного охолодження»** розглядається випадок взаємодії важкої зарядженої частинки з холодним електронним газом та обґрунтовується доцільність використання квантово-польових методів при вивченні взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом у зовнішньому магнітному полі. В підрозділі 2.2 розглянуто взаємодію важкої зарядженої частинки з електронним газом в рамках діелектричної моделі. Запропоновано натомість традиційній процедурі зшивки використовувати принцип відповідності для визначення явного виду кулонівського логарифму. Тоді, використовуючи результати, отримані в рамках квантово-польового підходу [1\*], в загальному випадку енергетичні втрати важкої зарядженої частинки в холодній магнітоактивній плазмі в рамках класичної

діелектричної моделі можна представити у вигляді

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{Q_i^2 \omega_P^2}{V_i} (L_C - f(\omega_H, \alpha)), \quad (1)$$

де  $Q_i$  – заряд іона,  $\omega_P$  і  $\omega_H$  – плазмова і циклотронна частоти електронів,  $V_i$  – швидкість іона, перший доданок  $L_C$  – кулонівський логарифм, а другий доданок  $f(\omega_H, \alpha)$  визначає вплив магнітного поля на енергетичні втрати іона в холодному електронному газі. У випадку повздовжнього до магнітного поля руху ( $\alpha = 0$ )

$$f = \sqrt{1 + \frac{\omega_H^2}{\omega_P^2}}, \quad (2)$$

у випадку поперечного руху ( $\alpha = \pi/2$ )

$$f = \frac{1}{4} \frac{\omega_H^2}{\omega_P^2} + \frac{1}{16} \frac{\omega_H^4}{\omega_P^4} \ln \left( \frac{1}{4} \frac{\omega_H^2}{\omega_P^2} \right), \quad \frac{\omega_H}{\omega_P} \ll 1; \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \ln \left( \frac{1}{4} \frac{\omega_H^2}{\omega_P^2} \right), \quad \frac{\omega_H}{\omega_P} \gg 1.$$

На рис. 1 побудована залежність функції  $f(\alpha, h)$  рівняння (1) а) від кута вльоту іона для випадку  $\omega_H/\omega_P = 10$ , б) від напруженості магнітного поля, параметр  $h = \omega_H/\omega_P$ , для кута вльоту іона  $\alpha = \pi/4$ , отримана як результат чисельного розрахунку аналітичних виразів, обчислених в рамках діелектричного підходу (кружки) та квантової теорії поля [1\*] (суцільна лінія).

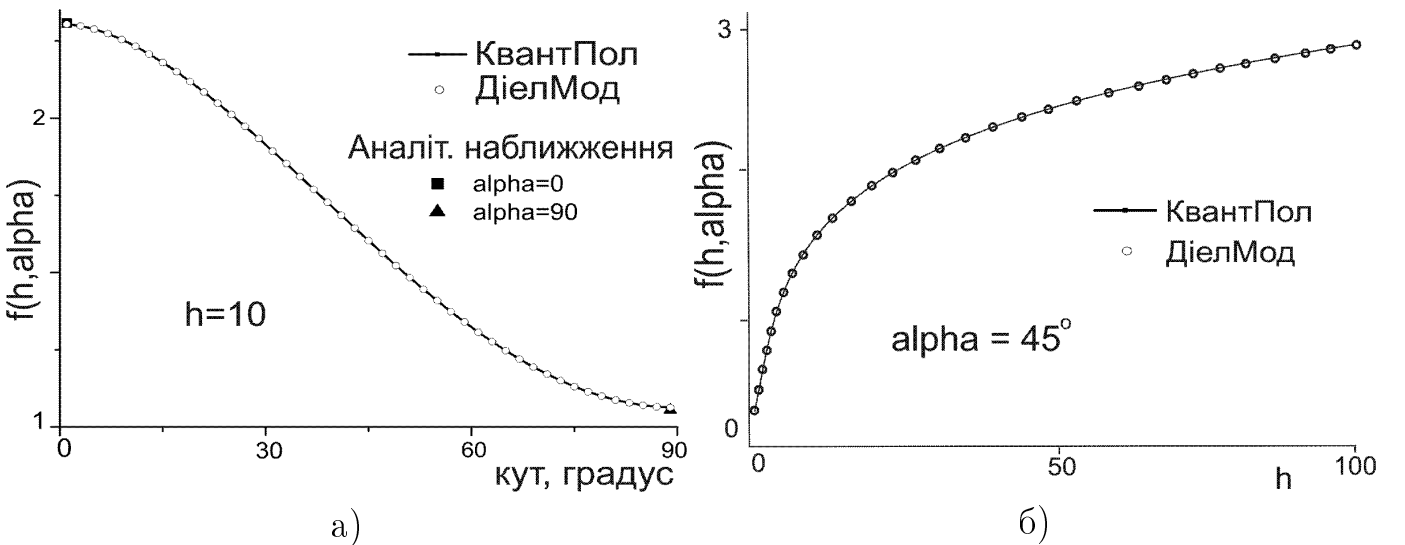


Рис. 1. Залежність функції  $f(\alpha, h)$  а) від кута вльоту іона для випадку  $\omega_H/\omega_P = 10$ , б) від напруженості магнітного поля для кута вльоту іона  $\alpha = \pi/4$ . Суцільна лінія – квантова теорія, робота [1\*] кружки – діелектрична модель, р.(1)



Результати розглянутих підходів добре узгоджуються між собою. У випадку холодної плазми сильне магнітне поле,  $\hbar \gg 1$ , подавляє передачу енергії. Функція  $f(h, \alpha)$  при вимкненні магнітного поля,  $\vec{B} \rightarrow 0$ , прямує до 0.

В підрозділі 2.3 проведена оцінка квантових поправок в силу тертя, що діє на протон в замагніченому електронному газі, зокрема, температура виродження електронного газу  $T_0$  на 5 порядків нижча за енергію теплового руху електронів  $T_e$ , а відношення між поперечною кінетичною енергією та енергією переходу між рівнями Ландау електронів складає 3 порядки. Хоча для сучасних установок з електронного охолодження квантові поправки не суттєві, проте квантово-польовий підхід дає можливість з перших принципів дослідити явище взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом з анізотропним розподілом за швидкостями в магнітному полі.

В третьому розділі «Вплив температури на гальмівну здатність електронного газу» методами квантової теорії поля враховано вплив температури електронного газу на енергетичні втрати налітаючого іона. При цьому електрони можуть мати як ізотропний, так і анізотропний розподіл за швидкостями. Важка заряджена частинка найефективніше втрачає свою енергію при швидкостях  $V_i$  близьких до теплових швидкостей електронів  $v_e$ , але аналітичні розв'язки для гальмівної здатності електронного газу можна знайти лише в декількох випадках: при великих  $V_i \gg v_e$  і малих  $V_i \ll v_e$  швидкостях налітаючої частинки. Область, де частинка втрачає максимальну кількість енергії  $V_i \approx v_e$ , досліджено чисельно.

В підрозділі 3.2 досліджено вплив ізотропної температури електронного газу  $T_e$  на енергетичні втрати. Знайдені в роботі аналітичні вирази для діелектричної сприйнятливості електронного газу з ізотропним розподілом за швидкостями мають вигляд

$$\text{Im}\kappa(k, \omega) = \sqrt{\frac{\pi m_e \omega_P^2 m_e}{2T_e \hbar k k^2}} \sum_{j=1}^2 (-1)^j \exp(-\xi_j^2). \quad (4)$$

$$\text{Re}\kappa(k, \omega) = \sqrt{\frac{\pi m_e \omega_P^2 m_e}{2T_e \hbar k k^2}} \sum_{j=1}^2 (-1)^{j+1} \exp(-\xi_j^2) \text{erfi}(\xi_j), \quad (5)$$

$$\xi_j = \frac{1}{\hbar k} \sqrt{\frac{m_e}{2T_e}} \left( \hbar \omega + (-1)^{j+1} \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \right). \quad (6)$$

Дійсна та уявна частини, рівняння (4) і (5) розраховані для максвелівського розподілу електронів за швидкостями  $n_p = \exp(-\varepsilon_p/T_e)$ . Знайдено енергетичні втрати важкої зарядженої частинки в ряді наближень, зокрема в наближенні

великих

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{q^2 \omega_P^2}{V_i} \left( L_C - \frac{3}{2} \frac{T_e}{m_e V_i^2} \right) \quad (7)$$

та малих швидкостей налітаючої частинки.

$$-\frac{dE}{dt} \approx \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^2 \omega_P^2 V_i^2}{v_e^3} \left[ L_C - \frac{1}{2} \right]. \quad (8)$$

Область  $V_i \sim v_e$  досліджувалася чисельними методами. Для чисельного розрахунку вибрані типові параметри електронного охолодження для проекту HESR [4\*]:  $\omega_P = 2.9 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ , температура електронного газу  $T_e = 10^{-4} \div 1 \text{ eV}$ .

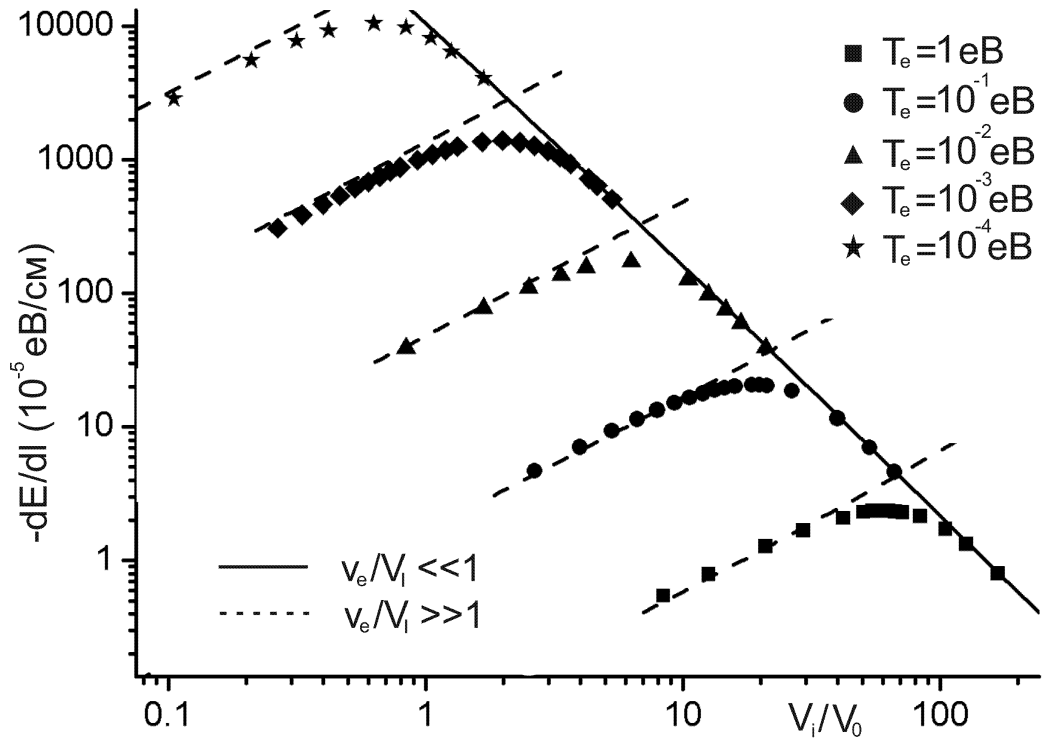


Рис. 2. Залежність гальмівної здатності електронного газу від швидкості налітаючої важкої зарядженої частинки. Температура електронного газу ізотропна: квадрати —  $T_e = 1 \text{ eV}$ , круги —  $T_e = 10^{-1} \text{ eV}$ , трикутники —  $T_e = 10^{-2} \text{ eV}$ , ромби —  $T_e = 10^{-3} \text{ eV}$ , зірки —  $T_e = 10^{-4} \text{ eV}$ . Суцільна лінія — наближення великих швидкостей іона  $v_e/V_i \ll 1$ , пунктирні лінії — наближення малих швидкостей іона  $v_e/V_i \gg 1$  для представленого спектру температур електронного газу. Швидкість вимірюється в одиницях  $V_0 = 10^{-6} \text{ cm/s}$ . Вісі мають логарифмічні шкали.

На рис. 2 представлені результати чисельного розрахунку гальмівної здатності електронного газу від швидкості налітаючої зарядженої частинки. Електронний газ має ізотропний розподіл за швидкостями (ізотропний розподіл

за швидкостями електронів): квадрати —  $T_e = 1$  еВ, круги —  $T_e = 10^{-1}$  еВ, трикутники —  $T_e = 10^{-2}$  еВ, ромби —  $T_e = 10^{-3}$  еВ, зірки —  $T_e = 10^{-4}$  еВ. Суцільна лінія відповідає аналітичному результату, отриманому в наближенні великих швидкостей іона  $v_e/V_i \ll 1$ , пунктирні лінії — наближення малих швидкостей іона  $v_e/V_i \gg 1$  для представленого спектру температур електронного газу. Зі зниженням температури електронного газу відбувається ріст значень гальмівної здатності. При цьому максимум сили тертя зміщується в сторону менших швидкостей налітаючої частинки. Їх положення відповідає значенням  $V_i = \sqrt{2}v_e$ . При низьких швидкостях іона спостерігається лінійна залежність енергетичних втрат важкої зарядженої частинки від швидкості  $dE/dl \propto V_i/v_e^3 L_C$ . Кут нахилу прямих залежить від значень теплових швидкостей електронного газу. При швидкостях іона, що перевищують теплові швидкості електронного газу, температура електронного газу перестає відігравати суттєву роль — результати лягають на одну криву залежності сили тертя від швидкості іона  $dE/dl \propto 1/V_i^2 L_C$ .

В підрозділі 3.3 розвинуто квантово-польовий підхід для врахування впливу анізотропної температури електронного газу на енергетичні втрати зарядженої частинки. Розрахована діелектрична проникність електронного газу для максвелівського двох-температурного розподілу за швидкостями

$$n_p = \exp\left(-\frac{p_x^2 + p_y^2}{2m_e T_{e\perp}}\right) \exp\left(-\frac{p_z^2}{2m_e T_{e\parallel}}\right), \quad (9)$$

де поперечна та повздовжня температури визначаються як  $T_{e\perp} = m_e v_{e\perp}^2$  і  $T_{e\parallel} = m_e v_{e\parallel}^2$ , відповідно.  $v_{e\perp}$  і  $v_{e\parallel}$  — середні поперечна та повздовжня теплові швидкості:

$$\kappa(k, \omega) = \sum_{j=1}^2 (-1)^{j-1} \left(\frac{\pi m_e}{2T_{e\perp}}\right)^{1/2} \frac{\omega_P^2 m_e}{\hbar k^* k^2} \exp(-\xi_j^2) [i - \operatorname{erfi}(\xi_{\pm})], \quad (10)$$

$$\xi_j = \frac{\sqrt{m_e}}{\sqrt{2T_{e\perp}}} \left(\frac{\omega}{k^*} + (-1)^{j-1} \frac{\hbar k}{2m_e k^*}\right), \quad j = 1, 2. \quad (11)$$

Величина  $k^* = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 T_{e\parallel}/T_{e\perp}}$  у випадку ізотропного розподілу  $T_{e\parallel} = T_{e\perp} = T_e$  переходить у звичайний хвильовий вектор  $k$ .

Гальмівна здатність електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями рівна в наближеннях великих  $V_i \gg v_{e\perp, \parallel}$

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{e^2 \omega_P^2}{V_i} \left(1 + 3 \frac{T_{e\parallel}}{m_e V_i^2} - 3 \frac{T_{e\perp}}{m_e V_i^2}\right) L_C - \frac{3}{2} \frac{T_{e\parallel}}{m_e V_i^2}. \quad (12)$$

та малих  $V_i \ll v_{e\perp, \parallel}$  швидкостей важкої зарядженої частинки

$$-\frac{dE}{dl} \approx \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^2 \omega_P^2}{v_{e\perp} v_{e\parallel}} V_i \left[L_C - \frac{1}{2}\right]. \quad (13)$$

Вплив анізотропного розподілу за швидкостями стає суттєвим в обох наближеннях. Дослідження області  $V_i \sim v_{e\perp, \parallel}$  було проведено за допомогою чисельних методів. Для чисельного розрахунку вибрані типові параметри електронного охолодження для проекту HESR [4\*]:  $\omega_P = 2.9 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ , поперечна та повздовжня температури електронного газу  $T_{e, \perp} = 10^{-4} \div 1 \text{ eV}$ ,  $T_{e, \parallel} = 10^{-4} \div 1 \text{ eV}$ .

На рис. 3 а, б представлена залежність гальмівної здатності електронного газу з анізотропним розподілом за імпульсами від швидкості налітаючої частинки. Залежність побудована для різних значень параметра анізотропії  $\gamma$ .

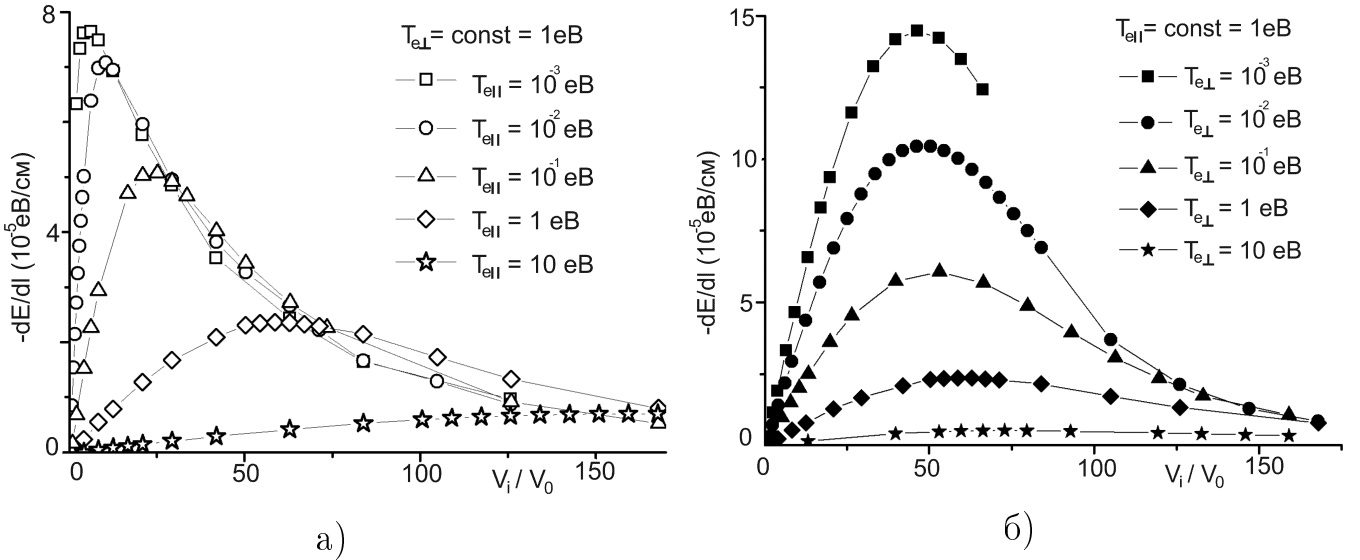


Рис. 3. Залежність гальмівної здатності  $e^-$ -газу (в одиницях  $10^{-5} \text{ eV/cm}$ ) від швидкості протона для випадків: а) Поперечна температура фіксована  $T_{e\perp} = 1 \text{ eV}$ . Повздовжня температура змінюється: зірки—  $10 \text{ eV}$ , ромби —  $1 \text{ eV}$ , трикутники —  $0.1 \text{ eV}$ , круги —  $0.01 \text{ eV}$ , квадрати —  $10^{-3} \text{ eV}$ ; б) Повздовжня температура фіксована  $T_{e\parallel} = 1 \text{ eV}$ . Поперечна температура змінюється: квадрати —  $10 \text{ eV}$ , трикутники —  $1 \text{ eV}$ , круги —  $0.1 \text{ eV}$ , ромби —  $0.01 \text{ eV}$ , зірки —  $10^{-3} \text{ eV}$ . Швидкість протона  $V_i$  в одиницях  $V_0 = 10^6 \text{ cm/c}$ .

При фіксованій поперечній температурі  $T_{e\perp} = 1 \text{ eV}$  (рис. 3 а) максимуми на кривих залежності гальмівної здатності спостерігаємо при швидкостях налітаючого іона близьких до теплових повздовжніх швидкостей електронного газу. Найнижча крива (зірки) відповідає значенню найвищої повздовжньої температури ( $10 \text{ eV}$ ). При зменшенні значень повздовжньої температури ( $1 \text{ eV}$  — ромби;  $10^{-1} \text{ eV}$  — трикутники;  $10^{-2} \text{ eV}$  — круги;  $10^{-3} \text{ eV}$  — квадрати) максимум енергетичних втрат зростає. У випадку, коли фіксованою є повздовжня температура  $T_{e\parallel} = 1 \text{ eV}$  (рис. 3 б), а поперечна змінюється ( $10 \text{ eV}$  — лінія із зафарбованими квадратами;  $1 \text{ eV}$  — лінія із зафарбованими кругами;  $10^{-1} \text{ eV}$  — лінія із зафарбованими трикутниками;  $10^{-2} \text{ eV}$  — лінія із зафарбованими ромбами;  $10^{-3} \text{ eV}$  — лінія із зафарбованими зірками). Максимуми кривих майже не змінюють свого положення, яке співпадає зі значенням теплової

повздовжньої швидкості. Найвищий максимум кривих відповідає найнижчій поперечній температурі електронного газу  $T_{e\perp} = 10^{-3}$  eВ.

При великих швидкостях налітаючої частинки  $V_i/v_e \gg 1$  всі криві залежностей поступово "зливаються" в одну криву, що визначається рівнянням (12). Для малих значень швидкостей налітаючої частинки спостерігаємо лінійну залежність гальмівної здатності. Кут нахилу ліній визначається з рівняння (13).

Таким чином, можемо констатувати, що анізотропний розподіл електронів за швидкостями, впливає на положення максимуму гальмівної здатності та його величину. Результати чисельних розрахунків добре узгоджуються з аналітичними виразами у наближеннях великих та малих швидкостей налітаючої зарядженої частинки, з результатами інших авторів та з експериментальними даними.

В четвертому розділі «Гальмівна здатність замагніченого електронного газу» розвинуто квантово-польовий формалізм для дослідження енергетичних втрат важкої зарядженої частинки в замагніченому електронному газі з врахуванням анізотропного розподілу електронів за швидкостями. В експериментах з електронного охолодження для утримання електронного пучка від розльоту використовують зовнішнє однорідне магнітне поле. Магнітне поле спрямовують так, щоб напрями вектора магнітної індукції та вісь електронного пучка співпадали. Квантово-польовий підхід із перших принципів дає можливість врахувати вплив на енергетичні втрати як температури електронного газу, так і зовнішнього магнітного поля. Вплив перелічених факторів є ключовим для експериментів з використанням електронного охолодження. В підрозділі 4.2 досліджено вирази для уявної та дійсної частин діелектричної сприйнятливості магнітоактивного електронного газу з анізотропним розподілом електронів за швидкостями, зокрема, знайдено явний вигляд спецфункції

$$\Lambda_{\nu,\nu'}(a) = \begin{cases} \frac{\nu!}{(\nu+s)!} a^{2s} \exp(-a^2) L_\nu^s(a^2) L_\nu^s(a^2), & \nu' \geq \nu, \\ \frac{\nu'!}{(\nu'+s)!} a^{2s} \exp(-a^2) L_{\nu'}^s(a^2) L_{\nu'}^s(a^2), & \nu' \leq \nu \end{cases}, \quad (14)$$

де  $\nu, \nu'$  – початковий та кінцевий рівні Ландау електрона,  $s = |\nu, -\nu'|$ ,  $a^2 = (\hbar^2 k_\perp^2 / 2m_e)(1/\hbar\omega_H)$ . В наближення великих значень аргументу  $a^2 \gg 1$ , наприклад, у випадку слабких магнітних полів

$$\Lambda_{\nu,\nu'} \left( q_t \frac{\sqrt{\delta_0}}{\sqrt{\hbar}} \right) = \frac{1}{2\pi} \frac{2m_e\omega_H}{\hbar} \frac{1}{\Delta_{k_t, p_t, p'_t}}, \quad (15)$$

де  $\Delta_{k_t, p_t, p'_t}$  – трикутник, побудований на імпульсах  $k_t, p_t, p'_t$ . У випадку, коли імпульси  $\hbar q_t, r_t, r'_t$  не утворюють трикутника, то  $\Lambda_{\nu,\nu'}(a)$  приймає значення 0.

На рис. 4 представлено графічне зображення  $\Lambda_{\nu,\nu'}(a)$ -функції для рівнів Ландау: а)  $\nu = 5, \nu' = 5$ ; б)  $\nu = \nu' = 10$ . Суцільна лінія відповідає прямому

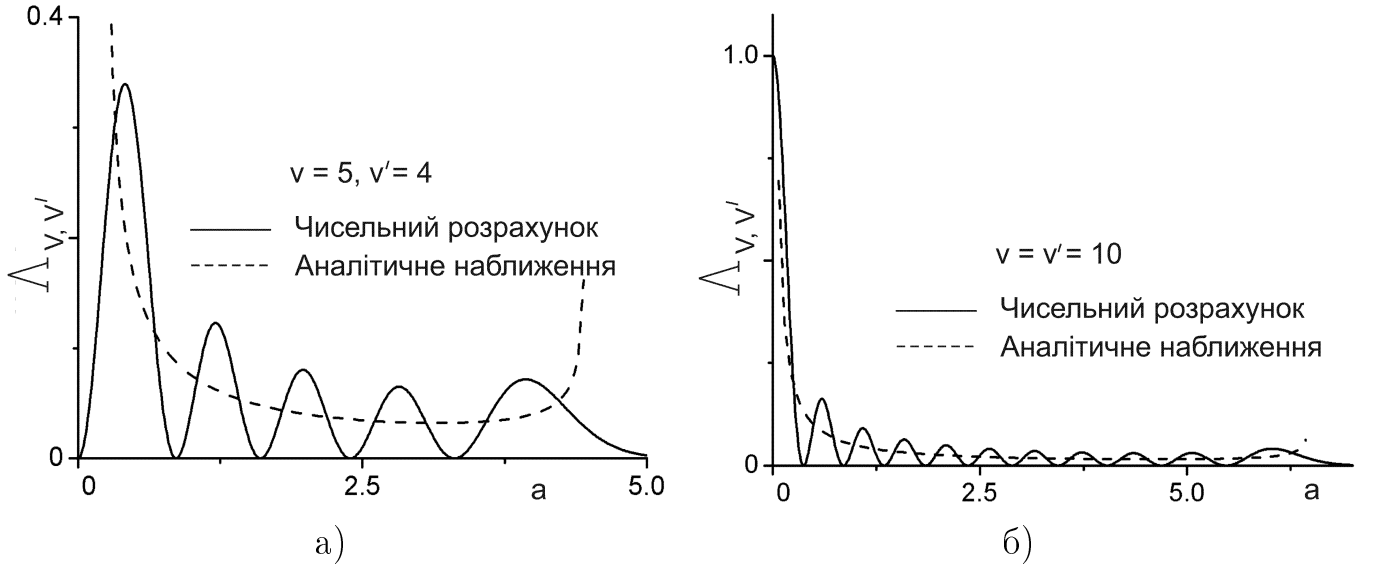


Рис. 4. Залежність  $\Lambda_{\nu, \nu'}$  від аргумента  $a$ . а)  $\nu = 5, \nu' = 5$  б)  $\nu = \nu' = 10$ .  
Пунктирна лінія — аналітичний результат, суцільна лінія — чисельний розрахунок.

чисельному розрахунку  $\Lambda_{\nu, \nu'}(a)$ -функції, пунктирна — аналітичний результат, рівняння (15).

Враховуючи явний вигляд  $\Lambda_{\nu, \nu'}(a)$ -функції рівняння (15), було знайдено аналітичні вирази для уявної та дійсної частин діелектричної сприйнятливості магнітоактивного електронного газу з анізотропним розподілом електронів за швидкостями

$$\begin{aligned} \text{Im}\kappa(\vec{k}, \omega)_s &= -\frac{1}{4} \sqrt{\frac{m_e}{2\pi\tau_{\parallel}}} \frac{\omega_P^2}{\hbar k_z} \frac{m_e}{k^2} \times \\ &\exp\left(-a^2 \frac{1 + \exp(-\beta)}{1 - \exp(-\beta)}\right) \sum_{s=-\infty}^{\infty} I_s \left(2a^2 \frac{\exp(-\beta/2)}{1 - \exp(-\beta)}\right) \times \\ &\exp\left\{\frac{-s\beta}{2}\right\} \left(\exp\left\{-\left(\xi_1 + \xi_{hs}\right)^2\right\} - \exp\left\{-\left(\xi_2 - \xi_{hs}\right)^2\right\}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}\kappa(\vec{k}, \omega)_s &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{m_e}{2\pi\tau_{\parallel}}} \frac{\omega_P^2}{\hbar k_z} \frac{m_e}{k^2} \times \\ &\exp\left(-a^2 \frac{1 + \exp(-\beta)}{1 - \exp(-\beta)}\right) \sum_{s=-\infty}^{\infty} I_s \left(2a^2 \frac{\exp(-\beta/2)}{1 - \exp(-\beta)}\right) \exp\left\{-\frac{s\beta}{2}\right\} \times \\ &\left[\exp\left\{-\left(\xi_1 + \xi_{hs}\right)^2\right\} \text{erfi}(\xi_1 + \xi_{hs}) - \exp\left\{-\left(\xi_2 - \xi_{hs}\right)^2\right\} \text{erfi}(\xi_2 - \xi_{hs})\right], \end{aligned} \quad (17)$$

$$\xi_{jh} = \xi_j - \xi_h = \frac{1}{k_z} \sqrt{\frac{m_e}{2T_e}} (\omega + (-1)^{j-1} \hbar k_z^2 / 2m_e - s\omega_H), \quad j = 0, 1, \quad (18)$$

$\beta = \hbar\omega_H/T_{e\perp}$ ,  $a^2 = (\hbar^2 k_\perp^2 / 2m_e)(1/\hbar\omega_H)$ . Індекс  $s$  вказує на те, що у виразі залишилося провести сумування по індексові  $s$  — різниці між початковим та кінцевим енергетичними рівнями Ландау електронів.

Рівняння (16) і (17) справедливі для довільних значень напруженості магнітного поля і повздовжньої та поперечної температур електронного газу.

В підрозділі 4.3 визначено в рамках квантово-польового підходу енергетичні втрати важкої зарядженої частинки в наближенні холодної електронної плазми, наближення великих швидкостей іона, зокрема, у випадку сильного магнітного поля ( $\omega_H/\omega_P \gg 1$ )

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{q^2 \omega_P^2}{V_i} \left[ \left( 1 - 4 \frac{v_{e\parallel}^2}{V_i^2} \left( \frac{\omega_H}{\omega_P} \right)^4 - 2 \frac{v_{e\perp}^2}{V_i^2} \left( \frac{\omega_H}{\omega_P} \right)^2 \right) L_C - f(\omega_H, T_{e\perp}, T_{e\parallel}) \right], \quad (19)$$

де  $f(\omega_H, T_{e\perp}, T_{e\parallel}) = \ln \left( \sqrt{1 + (\omega_H/\omega_P)^2} \right) + (\omega_H/\omega_P)^4 2\tau_{\parallel}/3 - (\omega_H/\omega_P)^2 \tau_{\perp}/3$ .

В експерименті [5\*] параметр відношення другого та третього доданків в множнику біля кулонівського логарифму  $\xi = 2(T_{\parallel}/T_{\perp})(\omega_H^2/\omega_P^2)^2$  був порядку одиниці. На сучасних установках, наприклад, проект HESR (High Energy Storage Ring),  $\xi \approx 10$ . Вклад від повздовжньої складової теплового руху електронів значно вищий, ніж від поперечної.

Область швидкостей  $V_i \approx v_e$  було досліджено чисельними методами.

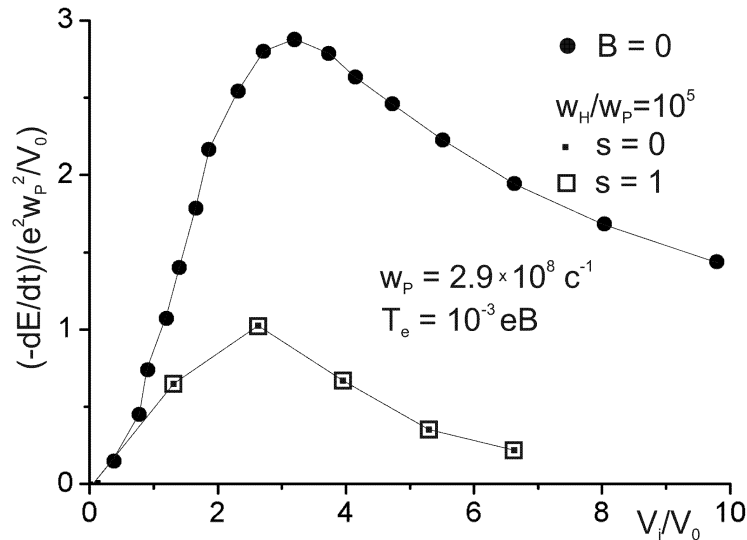


Рис. 5. Залежність гальмівної здатності  $dE/dl$  від швидкості налітаючого іона для випадку повної замагніченості  $\beta \gg 1$  (круги — без магнітного поля, точки та квадрати — враховуються тільки 0 та 0-1 члени, відповідно для  $\omega_H/\omega_P = 10^5$ )

Сильне магнітне поле подавляє поперечний тепловий рух електронів, тому виходячи з виразів для діелектричної сприйнятливості достатньо врахувати кілька перших переходів між рівнями Ландау. На рис. 5 представлені чисельні розрахунки гальмівної здатності замагніченого електронного газу для випадку повної замагніченості,  $\beta \gg 1$ .

Магнітне поле пригнічує процес передачі енергії між електронним газом та налітаючим іоном. Як результат, втрати енергії зменшились. Таке зменшення суттєве для швидкостей іона порядку та більших за теплову швидкість електронів. У випадку, повної замагніченості  $\beta \gg 1$  ( $B \approx 150$  Тл), для розрахунків сили тертя достатньо врахувати лише нульовий перехід (точки), врахування ще одного члена (квадрати) не змінює результату. Отримані результати у випадку ізотропного розподілу добре узгоджуються з результатами, отриманими в роботі [7\*].

Реальний електронний пучок електронів після прискорення має виражений анізотропний розподіл за швидкостями відносно напрямку прискорення, повздовжня температура на порядки менша за поперечну. Використання в експериментах зовнішнього повздовжнього магнітного поля дає можливість замагнітити поперечний рух електронів, роблячи ефективну температуру електронного пучка на кілька порядків менше, ніж у випадку без магнітного поля. Таке поєднання впливів анізотропного розподілу електронів за швидкостями та сильного магнітного поля сильно змінює процес взаємодії налітаючого іона та електронів. На рис. 6 а, б представлені чисельні розрахунки гальмівної

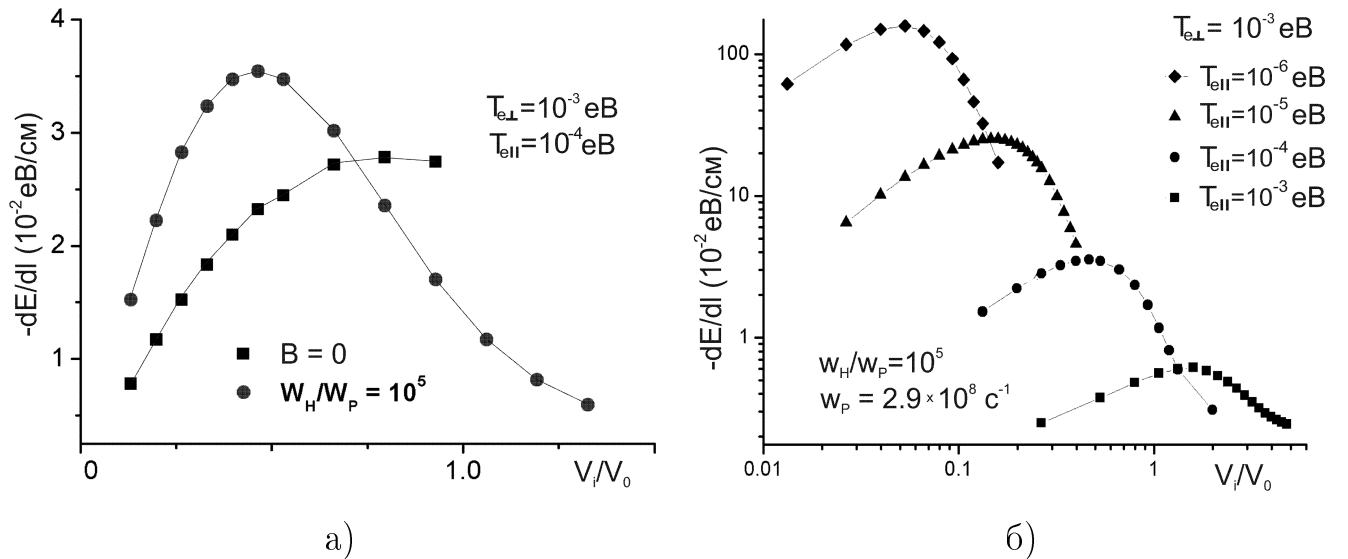


Рис. 6. Залежність гальмівної здатності  $dE/dl$  від швидкості налітаючого іона у випадку повної замагніченості,  $\beta \gg 1$ , електронного газу з анізотропною температурою: а)  $T_{\perp} = 10^{-3}$  eV,  $T_{\parallel} = 10^{-4}$  eV: квадрати — без магнітного поля, круги — з сильним магнітним полем; б) Поперечна температура фіксована  $T_{\perp} = 10^{-3}$  eV; повздовжня температура: квадрати —  $T_{\parallel} = 10^{-3}$  eV, круги —  $T_{\parallel} = 10^{-4}$  eV, трикутники —  $T_{\parallel} = 10^{-5}$  eV, ромби —  $T_{\parallel} = 10^{-6}$  eV. Швидкість вимірюється в одиницях  $V_0 = 10^6$  см/с.



здатності замагніченого електронного газу з анізотропною температурою. На рис. 6 а показано, що при гальмуванні іона електронним газом з анізотропним розподілом електронів ( $T_{e\perp} = 10^{-3}$  еВ,  $T_{e\parallel} = 10^{-4}$  еВ) магнітне поле підвищує максимальне значення сили тертя в 1,2 рази. Спостережуваний ефект протилежний до випадку використання електронів з ізотропною температурою. На рис. 6 б побудований ряд залежностей гальмівної здатності для різних значень повздовжньої температури електронного газу: квадрати —  $T_{\parallel} = 10^{-3}$  еВ, круги —  $T_{\parallel} = 10^{-4}$  еВ, трикутники —  $T_{\parallel} = 10^{-5}$  еВ, ромби —  $T_{\parallel} = 10^{-6}$  еВ. Поперечна температура фіксована  $T_{\perp} = 10^{-3}$  еВ. При зменшенні повздовжньої температури спостерігаємо картину, подібну до випадку без магнітного поля — ріст максимуму гальмівної здатності, і поступове зміщення його положення в область малих швидкостей іона. У випадку, 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.

## ВИСНОВКИ

1. Вперше знайдено в рамках квантово-польового підходу аналітичні вирази для дійсної та уявної частин діелектричної сприйнятливості замагніченого електронного газу з анізотропним розподілом за швидкостями.

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

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

а) при ізотропному розподілі електронів за швидкостями :

1) вплив температури на енергетичні втрати суттєвий при швидкостях іона  $V_i \leq v_e$ . При  $V_i \gg v_e$  доданки, що містять температурну залежність на порядок менші за кулонівський логарифм.

2) 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:

1) вплив температури суттєвий для всіх значень швидкостей іона. В наближенні великих швидкостей  $V_i \gg v_e$  температурна залежність міститься в множнику перед кулонівським логарифмом у вигляді  $1 + 3v_{e\parallel}/V_i - 3v_{e\perp}/V_i$ ;

2) для випадку, 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.

4. У випадку сильного зовнішнього магнітного поля, коли повністю подавлений поперечний рух електронів (напруженість магнітного поля  $B \sim 100$  Тл, поперечна температура електронного газу  $T_{e\perp} = 10^{-3}$  еВ), 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.

4. У випадку повної замагніченості електронного газу охолодження (передача енергії) важкої зарядженої частинки електронами з анізотропним розподілом за швидкостями відбуватиметься швидше (значення максимуму гальмівної здатності більше) та глибше (положення максимуму гальмівної здатності визначається вздовжньою тепловою швидкістю електронів, яка на порядок нижча за поперечну), допустима температура охолодження менша.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1\*. Ахиезер А.И. Электродинамика плазмы / А.И. Ахиезер, И.А. Ахиезер, Р.В. Половин и др. – М.: Наука, 1974.

2\*. Ахиезер И.А. К теории взаимодействия заряженной частицы с плазмой в магнитном поле / И.А. Ахиезер // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1961. – Т.40, №3. – С.954-962.

3\*. Ларкин А.И. Прохождение частиц через плазму / А.И. Ларкин // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1959. – Т.37, №1. – С.264-272.

4\*. Stohlker T. SPARC experiments at the HESR. a feasibility study electron cooling of charged particles / T. Stohlker, R. Schuch, S. Hagmann et al. – 2012. – Access mode: [www.gsi.de/fileadmin/SPARC/documents/](http://www.gsi.de/fileadmin/SPARC/documents/).

5\*. Budker G.I. New results of research on electron cooling / G.I. Budker, A.F. Bulushev, N.S. Dikanskij et al. Preprint of Institute of Nuclear Physics USSR Academy of Sciences IYaF 76-32 . Translated at CERN by O. Barbalat CM-P00100706. – Geneva : CERN, 1977.

6\*. Derbenev Ya.S. Studies on electron cooling of heavy particle beams made by the VAPP-NAP group at the Nuclear physics institute of the Siberian branch of the USSR academy of science at Novosibirsk. / Ya.S. Derbenev, I.N. Meshkov. Preprint CERN 77-08 1977. – Geneva : HESR, 1977.

7\*. Steinberg M. Energy loss of a charged particle in a magnetized quantum plasma / M. Steinberg, J. Ortner // Phys. Rev. E. – 2001. – Mar. – Vol. 63. – P. 046401.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Khelemelya O.V.** Dielectric model of energy losses by a massive charged particle moving through cold magnetized plasma / O.V. Khelemelya, R.I. Kholodov, V.I. Miroschnichenko // Ukr. J. Phys. – 2013. – Vol. 58. – No. 8. – P. 725-734.
2. **Khelemelya O.V.** Quantum field methods in the electron cooling/ O.V. Khelemelya, R.I. Kholodov // Problems of atomic science and technology. – 2013. – No. 3(85). – P. 53-57.
3. **Khelemelia O.V.** The influence of the anisotropic temperature of the electron gas on energy losses of a charged particle in a plasma / O.V. Khelemelia, R.I. Kholodov // Problems of atomic science and technology. – 2015. – № 1(95). – P. 69-72.
4. **Khelemelia O.V.** Stopping power of an electron gas with anisotropic temperature / O.V. Khelemelia, R.I. Kholodov // Modern Physics Letters A. – 2016. - Volume: 31. - Number: 13
5. **Khelemelia O.V.** The influence of the external magnetic field on energy losses of a charged particle in an electron gas / O.V. Khelemelia, R.I. Kholodov // Problems of atomic science and technology. – 2017. – №1. – P.68-71.
6. **Khelemelia O.V.** Electron cooling force calculation in plasma dielectric frame / O.V. Khelemelya // Trans-European School of High Energy Physics – TESHER'2011, 7-14 July 2011: proceedings. – Alushta, Crimea, Ukraine, 2011. – P. 177-178.
7. **Хелемеля О.В.** Втрати важкої зарядженої частинки в замагніченій електронній плазмі / О.В. Хелемеля // Матеріали І міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених. Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики. – СПЕТФ'2012. – Суми, Україна, 2012. – С. 75-76.
8. **Khelemelia O.V.** Calculation of the Electron Thermal Plasma Permittivity / O.V. Khelemelia // 12-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Network Modeling (LFNM), 2-4 October 2013: proceedings. – Sudak, Crimea, Ukraine, 2013. – С. 55-57
9. **Хелемеля О.В.** Енергетичні втрати зарядженої частинки в електронному газі з врахуванням температури / О.В. Хелемеля, Р.І. Холодов // ХХІ щорічна наукова конференція інституту ядерних досліджень НАН України. – Київ. Україна, 2014. – С. 157.
10. **Khelemelia O.V.** The Influence of the Anisotropic Temperature of the Electron Gas on Energy Losses of Charged Particle in a Plasma / O.V. Khelemelia, R.I. Kholodov // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion. ICPPCF'2014. – Kharkiv. Ukraine. September 15-18, 2014. – P. 62.
11. **Хелемеля О.В.** Втрати важкої зарядженої частинки в плазмі з врахуванням температури електронного газу / О.В. Хелемеля, Р.І. Холодов // Школа-семінар. Багатомасштабне моделювання фізичних процесів у конденсованих середовищах. Multiscale Modeling of Physical Processes in Condensed Matter, 21-22 жовтня 2014: тези доповідей – Суми. Україна, 2014. – С. 28

12. **Хелемеля О.В.** Вплив анізотропії температури електронів на гальмівну здатність у плазмі / О.В. Хелемеля, Р.І. Холодов // Тези доповідей XXII щорічної наукової конференції інституту ядерних досліджень НАН України, 26-30 січня 2015: тези доповідей. – Київ. Україна, 2015. – С. 156-158

13. **Хелемеля О.В.** Визначення енергетичних втрат важкої зарядженої частинки в замагніченому електронному газі в рамках квантово-польового методу / О.В. Хелемеля, Р.І. Холодов // Тезиси докладов XIV конференції по фізиці високих енергій, ядерної фізиці і ускорителям, 22-25 марта 2016: тезиси докладов. – Харьков. Украина, 2016. – С. 112.

14. **Хелемеля О.В.** Діелектрична сприйнятливність електронного газу у зовнішньому магнітному полі / О.В. Хелемеля // Матеріали II міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених. Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики. – СПЕТФ'2016. – Суми, Україна, 2016. – С. 121.

15. **Khelemelia O.V.** The influence of the external magnetic field on energy losses of a charged particle in an electron gas / O.V. Khelemelia, R.I. Kholodov // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion. ICPPCF'2016. – Kharkiv. Ukraine. September 12-15, 2016. – P. 74.

16. **Хелемеля О.В.** Гальмівна здатність електронного газу в зовнішньому магнітному полі / О.В. Хелемеля, Р.І. Холодов // Тези доповідей XXIII щорічної наукової конференції інституту ядерних досліджень НАН України, 01-05 лютого 2016: тези доповідей. – Київ. Україна, 2016. – С. Д2.

17. **Хелемеля О.В.** Вплив сильного магнітного поля на гальмівну здатність електронного газу / О.В. Хелемеля // Матеріали III міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених. Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики. – СПЕТФ'2017. – Суми, Україна, 2017. – С. 75-76.

18. **Хелемеля О.В.** Енергетичні втрати важкої зарядженої частинки в замагніченому електронному газі / О.В. Хелемеля, Р.І. Холодов // XXIV щорічна наукова конференція інституту ядерних досліджень НАН України. – Київ. Україна, 13-14 квітня 2017. – С. 182.

19. **Хелемеля О.В.** Енергетичні втрати протона в замагніченому електронному газі / О.В. Хелемеля // Тезиси докладов XVI конференції по фізиці високих енергій, ядерної фізиці і ускорителям, 20-23 марта 2018. – Харьков. Украина, 2018. – С. 113.

## АНОТАЦІЯ

**Хелемеля О.В.** Втрати енергії важкої зарядженої частинки в замагніченому електронному газі з анізотропною температурою. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут прикладної фізики НАН України, м. Суми, 2018.

Дисертація присвячена теоретичному вивченню взаємодії важкої зарядженої частинки з електронним газом з анізотропним розподілом за швидкостями в зовнішньому магнітному полі.

В дисертації запропоновано для дослідження процесу електронного охолодження використовувати квантово-польовий підхід. Використання квантово-польових методів для знаходження енергетичних втрат зарядженої частинки в замагніченому електронному газі з анізотропним розподілом за швидкостями є обгрунтованим та доцільним, оскільки дає можливість, виходячи з перших принципів, визначити повний вираз для енергетичних втрат та врахувати вплив температури і зовнішнього магнітного поля.

В рамках квантово-польового підходу знайдено аналітичні вирази для дійсної та уявної частини діелектричної сприйнятливості у випадку анізотропного розподілу електронів за швидкостями в сильному зовнішньому магнітному полі. Використовуючи знайдені вирази було проведено чисельний розрахунок енергетичних втрат іона в електронному газі. Для ізотропного розподілу електронів за швидкостями сильне зовнішнє магнітне поле пригнічує процес обміну енергії між іоном та електронним газом для всіх значень швидкості важкої зарядженої частинки. При гальмуванні іона електронним газом з анізотропним розподілом електронів магнітне поле підвищує максимальне значення сили тертя в 300 разів (напруженість магнітного поля 150 Тл, повздовжня та поперечна температури  $10^{-6}$  еВ і  $10^{-3}$  еВ, відповідно). Спостережуваний ефект протилежний до випадку використання електронів з ізотропною температурою. Положення максимуму гальмівної здатності у випадку сильних магнітних полів визначається повздовжньою температурою електронів, оскільки поперечна передача енергії подавлена сильним зовнішнім магнітним полем. Показано, що охолодження важкої зарядженої частинки у зовнішньому магнітному полі електронами з анізотропним розподілом за швидкостями відбувається швидше (значення максимуму більше) та глибше (положення максимуму відповідає меншим швидкостям), допустима температура охолодження менша.

**Ключові слова:** електронний газ, енергетичні втрати, гальмівна здатність, ізотропна та анізотропна температура, магнітне поле, квантово-польовий метод, діелектрична сприйнятливість.

## АННОТАЦІЯ

**Хелемеля А.В. Потери энергии тяжелой заряженной частицы в замагниченном электронном газе с анизотропной температурой. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт прикладной физики НАН Украины, г. Суми, 2018.

Диссертация посвящена теоретическому изучению взаимодействия тяжелой заряженной частицы с электронным газом с анизотропным распределением по скоростям во внешнем магнитном поле.

В диссертации предложено для исследования процесса электронного охлаждения использовать квантово-полевой подход. Использование квантово-полевых методов для определения энергетических потерь заряженной частицы в замагниченном электроном газе с анизотропным распределением по скоростям является обоснованным, поскольку дает возможность, выходя из первых принципов, найти полное выражение для энергетических потерь.

В рамках квантово-полевого подхода найдены аналитические выражения для вещественной и мнимой частей диэлектрической восприимчивости в случае анизотропного распределения электронов по скоростям во внешнем магнитном поле. Используя найденные выражения был проведен численный расчет энергетических потерь иона в электронном газе. Для изотропного распределения электронов по скоростям сильное магнитное поле подавляет процес обмена энергией между ионом и элетронным газом. Уменьшение силы трения существенно для скоростей иона порядка и больших чем тепловая скорость элетронов. При торможении иона электронным газом с анизотропным распределением электронов магнитное поле увеличивает максимальное значение силы трения в 300 раз (напряженность магнитного поля 150 Тл, продольная и поперечная температуры  $10^{-6}$  эВ и  $10^{-3}$  эВ, соответственно). Наблюдаемый эффект противоположный случаю использования электронов с изотропною температурой. Положение максимума тормозной способности в случае сильных магнитных полей полностью определяется продольной температурой электронов, поперечная передача энергии подавлена магнитным полем. Показанно, что охлаждение тяжелой заряженной частицы во внешнем магнитном поле электронами с анизотропным распределением по скоростям происходит быстрее (значение максимума больше) и более глубоко (положение максимума соответствует меньшим скоростям), допустимая температура охлаждения меньше.

**Ключевые слова:** электронный газ, энергетические потери, тормозная способность, изотропная и анизотропная температура, магнитное поле, квантово-полевой метод, диэлектрическая восприимчивость.

## ABSTRACT

**Khelemelia O.V. Energy losses of a massive charged particle in a magnetized electron gas with anisotropic temperature. – Manuscript.**

The thesis for a degree of candidate in physics and mathematics, speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, 2018.

The thesis is devoted to theoretical investigation of the interaction a massive charged particle with an electron gas with anisotropic distribution of velocities in an external magnetic field.

A quantum-field method is proposed to use to study the process of electron cooling. The use of quantum-field approach to determine of energy losses of the charged

particle in the electron gas with anisotropic temperature is reasonable and apposite. One can to obtain a full expression of energy losses within quantum field method based on the first principles.

Analytic expressions of real and imaginary parts of susceptibility of electron gas with anisotropic velocity distribution in the external magnetic field within quantum field method are carried out. Numerical calculation of energy losses is performed using obtained expressions. The strong external magnetic field suppresses the process of energy exchange between the ion and the electron gas with isotropic velocity distribution. The strong external magnetic field increase the maximum value of the stopping power of the electron gas with anisotropic distribution in 300 times (strength of the magnetic field 150 T, longitudinal and transverse temperatures  $10^{-6}$  eV and  $10^{-3}$  eV, respectively). Observed effects is the opposite of the case with isotropic temperature. The position of maximum of cooling force is determined by the longitudinal temperature, the transverse energy transfer is suppressed by the strong magnetic field.

The cooling of the massive charged particle in the strong external magnetic field by electrons with anisotropic velocity distribution is performed more faster (the value of the maximum of the stopping power is more) and deeply (the position of the maximum of the stopping power corresponds to lower velocities), the allowable temperature is lower.

**Key words:** electron gas, energy losses, stopping power, isotropic and anisotropic temperature, magnetic field, quantum-field method, susceptibility.

Підп. до друку 31.08.2018 р.  
Формат 60x84/16. Ум.друк.арк. 0,9.  
Тираж 100 пр. Вид. №44.

Віддруковано у ВВП "Мрія-1" ТОВ.  
40000, м. Суми, вул. Кузнечна, 2.  
Тел. 22-13-23, 22-15-05, 67-92-15.