

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Тищенко Маргарити Германівни «Поширення альфвенових хвиль та перенесення енергії поперек магнітних поверхонь у тороїдальній плазмі», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальності 01.04.08 – фізика плазми

Загострення енергетичних проблем у світі штовхає людство до пошуку нових джерел енергії, одним з яких є термоядерний синтез. Дослідження з керованого термоядерного синтезу ведуться в багатьох країнах, зокрема, в Європейському Союзі вони здійснюються в рамках програми Євратома, асоційованим членом якої у 2017 році стала Україна. У Франції триває будівництво реактора-токамака ITER. Центральну роль у термоядерній програмі відіграють дослідження з фізики плазми. Лідерами в магнітному утриманні плазми (яке поряд з інерційним утриманням є провідним підходом до здійснення керованої термоядерної реакції) є пристрої з тороїдальною топологією магнітного поля – токамаки та стеларатори. Важливою характеристикою цих пристроїв є здатність добре утримувати частинки та енергію. При нагріванні плазми в цих пристроях шляхом інжекції нейтральних атомів з високою енергією або збудження хвиль з іонно-циклотронною частотою в плазмі утворюється значна кількість надтеплових (швидких) іонів, тобто іонів з енергією, що значно перевищує теплову. Ще одним важливим джерелом надтеплових іонів є термоядерні реакції; працюючий термоядерний реактор не може не містити значної популяції надтеплових альфа-частинок. Тому як для пояснення експериментів на існуючих пристроях, так і для проектування майбутніх реакторів є практично важливим вивчити взаємодію надтеплових іонів з хвилями та нестійкостями плазми. Отже, тема дисертації М.Г. Тищенко є актуальною. Дисертаційна робота М.Г. Тищенко присвячена актуальним питанням фізики магнітогідродинамічних хвиль у тороїдальних термоядерних пристроях. В ній вивчаються процеси поширення альфвенових хвиль поперек магнітного поля, знаходяться потоки енергії, які виникають при взаємодії швидких йонів з магнітогідродинамічними хвилями та магнітними островами.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел.

В першому розділі показано, що тороїдальність (та інші відхиленнями магнітної конфігурації від циліндричної геометрії.) може викликати трансформацію вихідної кінетичної альфвенової хвилі, з частотою, що лежить вище щілини альфвенового континууму, в кінетичну альфвенову хвилю з іншим полоїдальним номером моди ( $m$ ).



Знаходиться залежність коефіцієнта трансформації (який визначається як відношення потоку енергії трансформованої хвилі до потоку енергії падаючою хвилі) від ширини щілини та інших параметрів системи.

В другому розділі мова йде про цеберне перенесення - перемішування плазми в результаті зміщення енергійних йонів, захоплених в резонанс, коли просторова локалізація резонансів змінюється. Особлива увага приділена квазістаціонарним збуренням. В цьому розділі вивчається транспорт, викликаний зіткненням гальмуванням частинок та/чи часовою еволюцією плазмового струму.

В третьому розділі досліджується просторове каналювання - передача енергії швидких йонів модами, що збуджуються цими йонами, з однієї області плазми в іншу. Автором показано, як альфвенівські власні моди передають енергію поперек магнітного поля і оцінено величину потоку енергії, який вони здатні створити. Також в розділі представлені оцінки кількості та амплітуди хвиль необхідних для того, щоб утворилася широка стохастична область у фазовому просторі швидких йонів, і хвилі могли отримати значку частку потужності інжекції нейтрального пучка, щоб передати її в іншу просторову область плазми.

Четвертий розділ присвячений просторовому каналюванню, направленому в середину плазми. Метою дослідження було з'ясувати, чи може просторове каналювання енергії та імпульсу швидких йонів покращити параметри плазми, зокрема, пояснити експерименти, що спостерігались на токамаку JET, де під час кампанії Дейтерій-Тритієвих Експериментів (DTE1), загальний час утримання енергії плазми був не меншим, а трохи вищим при максимальній термоядерній потужності. Аналіз проведено в припущенні, що альфа-частинки, які знаходяться на периферії плазми, збуджують множинні швидкі магнітозвукові моди, що мають глобальну радіальну структуру. Показано, що швидкі магнітозвукові моди з частотами, близькими до циклотронних гармонік альфа-частинок, можуть бути в резонансі з йонами та електронами основної плазми, що знаходяться в центральній області плазми, передаючи енергію альфа-частинок в цю область. Це покращує ефективність нагрівання та загальне утримання плазми в згаданих експериментах.

У висновках сформульовано основні результати роботи

Серед найцікавіших, на мій погляд, результатів роботи хотів би відзначити такі:

- Показано, що відхилення від циліндричної симетрії (зокрема, тороїдальність) може мати наслідком лінійну трансформацію кінетичної альфвенової хвилі в іншу кінетичну альфвенову хвилю, яка відрізняється номером моди.



- Показано фізичний механізм передачі енергії поперек магнітного поля альфвеновими хвилями в тороїдальній плазмі. Знайдено, що на відміну від класичних альфвенових хвиль у нескінченній плазмі, альфвенові хвилі в тороїдальних системах спричиняють стиснення плазми завдяки зачепленню зі швидкими магнітозвуковими хвилями, що і вможлиблює передачу енергії.
- Вперше показано, що гальмування швидких іонів у токамаку за наявності порушень симетрії (магнітних островів) створює радіальні потоки частинок та енергії; знайдено величину та просторове розташування цих потоків..
- Вперше отримано оцінки для амплітуди множинних альфвенових мод, потрібної для того, щоб такі моди могли відібрати значну частку енергії швидких іонів, що є необхідною умовою просторового каналювання.
- Показано, що розвинена теорія доцентрового просторового каналювання енергії може пояснити експерименти на токамаку JET, які проводились під час дейтерій-третієвої кампанії (DTE1), де, ймовірно, мали місце аномальне іонне нагрівання та покращення утримання енергії плазми.

Практична цінність результатів роботи пов'язана з тим, що теоретичні дослідження, проведені в роботі, стосувались конкретних термоядерних систем – токамака JET (Велика Британія), та сферичного тора NSTX (США).

Зокрема, показано що просторове каналювання може відігравати важливу роль у покращенні характеристик плазми та зростанні іонної температури в експериментах із нагріванням плазми альфа-частинками у токамаку JET.

Отримано оцінки, які показують, що просторове каналювання могло бути основною причиною аномального перенесення енергії під час сильної інжекції нейтральних пучків в сферичному торі NSTX.

Явище трансформації модових номерів кінетичних альфвенових хвиль при їх радіальному поширенні може бути важливим для діагностики плазми, оскільки може змінювати модові номери, які спостерігаються в ході зовнішніх магнітних вимірювань. Крім того, практичним наслідком трансформації кінетичних альфвенових хвиль є те, що вона збільшує область поширення та поглинання хвиль, впливаючи на баланс енергії плазми.

Проведені дослідження цеберного перенесення енергійних іонів є корисними для інтерпретації результатів експериментів у режимах з немонотонним профілем коефіцієнту запасу стійкості.



Результати, отримані в дисертації, можуть бути використані в дослідженнях, що проводяться у ННЦ ХФТІ НАНУ, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, Інституті ядерних досліджень НАН України, Інституті фізики плазми Макса Планка (Німеччина), Принстонській лабораторії фізики плазми (США), Калемському науковому центрі (Велика Британія).

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи забезпечено коректною постановкою задач і коректним вибором аналітичних та числових методів їх розв'язання. Наукові положення, висновки й рекомендації дисертаційної роботи є достатньо і належним чином обґрунтованими. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.04.08 – “фізика плазми”

Наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовано в дисертації, достатньо повно викладені в 5 журнальних статтях (4 статті у закордонних фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science, і 1 стаття у фаховому виданні України, що входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science. Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію і доповідались на українських та міжнародних наукових конференціях та школах.

Разом з тим, дисертація не є вільною від недоліків. Відзначу декі з них.

1) Стверджується що: “Трансформація може бути важливою для діагностики, оскільки може змінювати модові номери, які спостерігаються в ході зовнішніх магнітних вимірювань.” Але ефект трансформації полоїдального номера моди ( $m$ ) для KAW наразі має обмежене застосування, оскільки цей номер рідко вимірюється в експериментах. 2) У висновках до другого розділу згадується гібридний операційний режим, але не описано, що це за режим. 3) Також вважаю що варто було б дати пояснення, що таке сайдбенд-резонанси, мова про які йде у третьому розділ. 4) На С.37 вживається вираз «...трансформація однієї гілки KAW...», але правильно було б сказати не гілки, а хвильового числа. 5) Деякі величини в тексті визначаються по декілька разів, наприклад  $v_A$ ,  $b$ , а також оператори  $\nabla_{\perp}$  та  $\nabla_{\parallel}$ .

Проте, вказані недоліки не впливають на високу оцінку дисертаційної роботи.

Вважаю, що дисертаційна робота М.Г. Тищенко виконана на високому науковому рівні, стиль викладення відповідає такому, що використовується в науковій літературі, а отримані автором результати є новими і науково обґрунтованими. Зміст автореферату є ідентичним до основних положень дисертації. За обсягом і рівнем наукових результатів, актуальністю, практичним значенням, кількістю та якістю публікацій робота М.Г. Тищенко «Поширення альфвенових хвиль та перенесення енергії поперек магнітних



поверхонь у тороїдальній плазмі» відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016, № 943 від 20.11.2019, № 607 від 15.07.2020), а її автор безумовно заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

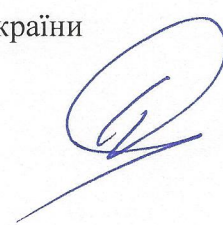
Офіційний опонент

Начальник лабораторії діагностики плазми

ІФП ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

кандидат фізико-математичних наук

старший науковий співробітник



М.Б. Древаль

Підпис М.Б. Древаль за свідченням



Засвідч. дир. ІФП, М. Курик.