

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 спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Актуальність теми дисертації. Дисертаційна робота М.Г. Тищенко присвячена актуальним питанням фізики магнітогідродинамічних хвиль у тороїдальних термоядерних пристроях. В ній представлено результати теоретичних досліджень фізики перенесення енергії поперек магнітних поверхонь альфвеновими хвилями та магнітними островами та ефектів просторового каналювання енергії швидких іонів дестабілізованими альфвеновими власними модами в токамаках. Енергійні іони виникають в термоядерних установках при застосуванні широко поширених методів нагрівання плазми, а також внаслідок реакцій ядерного синтезу. Вони відіграють важливу роль в енергобалансі плазми в існуючих термоядерних пристроях. У майбутньому реакторі на базі токамака чи стеларатора термоядерні альфа-частинки будуть підтримувати термоядерне горіння. Добре відомо, що швидкі іони, через відмінність їх функції розподілу від максвелової, є джерелом енергії нестійкостей плазми. Важливе місце серед них займають альфвенові нестійкості, які спостерігалися в усіх типах тороїдальних термоядерних пристроїв. В дисертації досліджуються енергетичні потоки, що виникають при взаємодії швидких іонів зі збуреннями електромагнітного поля токамака, а також вивчається перенесення енергії альфвеновими та магнітозвуковими хвилями, збудженими енергійними іонами. Роботи з фізики перенесення енергії швидких іонів збудженими хвилями були обумовлені експериментами на сферичному торі NSTX, де збільшення потужності інжекції нейтральних атомів супроводжувалося підсиленням альфвенівської активності з одночасним уширенням профілю температури в центрі плазми. Поясненням цього експерименту стало просторове каналювання енергії інжекттованих іонів – перенесення енергії з однієї області плазми до іншої області збудженими альфвеновими власними модами. Покращення утримання плазми в дейтерій-третієвих експериментах на токамаку JET може бути пояснено просторовим каналюванням, направленим в середину плазми. З вищесказаного випливає, що тема дисертації є, поза сумнівом, актуальною.

Структура та зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, де обговорюється актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, наукова новизна і практичне значення одержаних

результатів, вказується особистий внесок здобувача в наукових працях, шести розділів, висновків та бібліографії – всього 129 робіт. Загальний обсяг дисертації становить 140 сторінок.

У першому розділі вивчається трансформація модових номерів кінетичних альфвенових хвиль (КАХ), що є наслідком тороїдальності. З рівнянь, що описують дві зачеплені кінетичні альфвенові хвилі, отримано вирази для коефіцієнтів відбиття і проходження, які характеризують частку потоку хвилі, яка трансформується, і частку, яка тунелює через щілину, що утворилась біля точки перетину двох дисперсійних гілок КАХ, з'єднуючи гілки з різними модовими номерами. Показано, що трансформація може бути сильною для хвиль з малими полоїдальними номерами мод в токамаку-реакторі ITER та сферичному торі NSTX.

Другий розділ дисертації присвячено знаходженню потоків частинок та енергії при цеберному перенесенню внаслідок гальмування швидких іонів в полі квазістаціонарних збурень. Запропоновано гамільтонів формалізм, який можна застосовувати для випадку, коли зміщення резонансів відбувається внаслідок зіткненневого гальмування частинок та часової еволюції коефіцієнту запасу стійкості. Показано, що потік енергії, створений цеберним перенесенням, є значним у конфігураціях із малим широм, тому таке перенесення може бути важливим для гібридного операційного режиму і розрядів з оберненим широм. Також в даному розділі показано, що в конфігураціях з немонотонним профілем коефіцієнту запасу стійкості цеберний потік енергії зосереджується в просторі між магнітними островами.

Третій розділ присвячено просторовому каналюванню енергії швидких іонів альфвеновими хвилями. Досліджується фізичний механізм поперечного перенесення енергії альфвеновими хвилями в тороїдальній плазмі. Показано, що в тороїдальних системах перенесення енергії ідеальними альфвеновими хвилями, стає можливим завдяки зачепленню альфвенових хвиль зі швидкими магнітозвуковими хвилями, що спричинене стисненням плазми. Пораховано максимальний енергетичний потік, що може передаватися поперек магнітного поля GAE-модами та TAE-модами, коли область збудження моди швидкими іонами та область поглинання її енергії термічною плазмою є розділеними в просторі. Автором отримано аналітичний вираз для ширини островів, створених у фазовому просторі швидкого іона сайдбанд-резонансами з альфвеновими власними модами. Зроблені оцінки показують, що просторове каналювання могло бути основною причиною аномального перенесення енергії під час експериментів в сферичному торі NSTX, де збільшення потужності інжекції нейтральних атомів супроводжувалося підсиленням альфвенівської активності з одночасним уширенням профілю температури в центрі плазми.

В четвертому розділі досліджується просторове каналювання направлене всередину плазми і його вплив на покращення характеристик плазми та зростання іонної температури в експериментах з нагріванням альфа-частинками у токамаку JET. Аналіз проведено в припущенні, що альфа-частинки на периферії плазми збуджують швидкі магнітозвукові моди з глобальною радіальною структурою. Показано, що швидкі магнітозвукові моди з частотами, близькими до циклотронних гармонік альфа-частинок, можуть бути в резонансі з іонами та електронами основної плазми, що знаходяться в центральній області плазми. Таким чином ці моди можуть переносити, тобто каналювати, енергію альфа-частинок з периферії до центру плазми. Коли загасання швидких магнітозвукових мод на іонах переважає над загасанням на електронах, це призводить до аномального нагрівання іонів. Розвинену теорію доцентрового просторового каналювання застосовано для пояснення дейтерій-тритієвих експериментів на токамаку JET. Показано, що має місце якісне узгодження між електронною та іонною температурами в дейтерій-тритієвих розрядах токамака JET, що виміряні експериментально, та величинами температур, які пораховані чисельно.

У висновках викладено основні результати роботи.

Обґрунтованість наукових положень. Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи забезпечено використанням при їхньому отриманні добре відомих та апробованих аналітичних та числових методів і порівнянням отриманих результатів із експериментальними даними. Наукові положення, висновки й рекомендації дисертаційної роботи є достатньо і належним чином обґрунтованими.

Дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.

Оцінка новизни та практичне значення результатів. Дисертаційна робота містить цілу низку цікавих і практично важливих результатів, які отримані вперше. Відзначу деякі з них.

Знайдено групову швидкість деяких поширених типів альфвенових мод (GAE-мод та TAE-мод), що дозволило порахувати максимальний потік енергії, який може передаватись модою в радіальному напрямку.

Оцінено амплітуду множинних альфвенових мод, потрібну для того, щоб такі моди могли відібрати значну частку енергії швидких іонів, що є необхідною умовою просторового каналювання. Ці оцінки показують, що просторове каналювання могло бути основною причиною аномального перенесення енергії під час сильної інжекції нейтральних пучків в сферичному торі NSTX.

Досліджено вплив просторового каналювання енергії термоядерних альфа-частинок швидкими магнітозвуковими модами на енергобаланс в

експериментах із дейтерій-третієвою плазмою в токамаку JET. 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.

Досліджено новий механізм трансформації модового складу кінетичних альфвенових хвиль при проходженні певних раціональних магнітних поверхонь у тороїдному магнітному полі. Це може бути важливим для інтерпретації діагностики альфвенових мод зовнішніми магнітними зондами. Крім того, це явище може приводити до збільшення області поширення та поглинання хвиль, впливаючи на баланс енергії плазми.

Знайдено величину та просторове розташування радіальних потоків частинок та енергії, які виникають при гальмуванні швидких іонів у токамаку за наявності магнітних островів. 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 “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, Інституті ядерних досліджень НАН України, Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Харківському національному університеті ім. В. Н. Каразіна. Вони також можуть бути використаними у Інституті фізики плазми Макса Планка (Німеччина), Принстонській лабораторії фізики плазми (США), Калемському науковому центрі (Велика Британія).

Апробація роботи. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 5 наукових статей, надрукованих у провідних фахових міжнародних та українських виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science. Вони також неодноразово доповідались на українських та міжнародних наукових конференціях та школах. Наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані в дисертації, з достатньою повнотою викладені в опублікованих наукових статтях.

Зауваження до роботи.

1. В другому розділі характерна частота втрати частинок з цебра через поперечне розсіювання оцінюється як характерна частота цього розсіювання. Між тим, в цю оцінку треба додати ширину цебра за пітчутом, що збільшить ефективну частоту втрат через поперечне розсіювання. Внаслідок цього може змінитися оцінка того, при яких енергіях цей механізм працює.

2. У дисертації покращення характеристик плазми в дейтерій-третієвому експерименті на токамаку JET ґрунтується на припущенні, що швидкі магнітозвукові моди (ШММ) з частотами вище іонної циклотронної здійснюють каналування енергії термоядерних альфа-частинок з периферії до центру плазми. Проте, згідно з теорією та експериментальними спостереженнями надтеплової іонної циклотронної емісії (ІЦЕ) у багатьох токамаках, ШММ локалізовані поблизу границі плазми. В такому випадку вони не можуть транспортувати енергію до центру плазми.

Зроблені зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи М.Г. Тищенко.

Висновок. Роботу виконано на високому науковому рівні, а стиль викладення в цілому відповідає прийнятому в науковій літературі. Дисертаційна робота М.Г. Тищенко «Поширення альфвенових хвиль та перенесення енергії поперек магнітних поверхонь у тороїдальній плазмі» є завершеною науковою працею з актуальної теми, містить достатню наукову новизну і має практичну цінність, включає як теоретичні дослідження, так і застосування розвиненої теорії до конкретних термоядерних систем – токамака JET (Велика Британія), та сферичного тора NSTX (США). Автореферат відповідає тексту дисертації, достатньо повно відбиває її зміст, основні результати та висновки. Тема дисертації відповідає спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.

Дисертаційна робота М. Г. Тищенко відповідає усім вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з «Порядком присудження наукових ступенів», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (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). Вважаю, а її автор заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент

Заступник директора з наукової роботи
Інституту космічних досліджень НАН України
та Державного космічного агентства України
доктор фізико-математичних наук, професор



О.К. Черемних