

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертацію Лашкіна Володимира Михайловича

“СТІЙКІ НЕЛІНІЙНІ КОГЕРЕНТНІ СТРУКТУРИ В ДИСПЕРГУЮЧИХ  
СЕРЕДОВИЩАХ”,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних  
наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дослідження нелінійних когерентних структур, таких, як солітони та вихори, відіграють значну роль в середовищах хвильової природи, тобто в середовищах з дисперсією, де існують хвилі з різними типами дисперсії. В дисертації В. М. Лашкіна в якості таких диспергуючих середовищ розглядається плазма, Бозе-Ейнштейнівські конденсати та інші оптичні середовища. Як відомо, за рахунок дисперсії (тобто залежності групової швидкості хвилі від хвильового вектору) лінійний хвильовий пакет, локалізований в просторі, з часом розпливається. З другого боку, нелінійність без дисперсії обумовлює швидке перекидання хвилі. При цьому за рахунок балансу дисперсії та нелінійності можуть утворюватися когерентні структури типу солітонів, вихорів та ін. Зокрема, вони часто виникають як в лабораторній, так і в космічній плазмі (що підтверджується численними спостереженнями з супутників). Дослідження цих структур в ближньому космосі важливе, зокрема, для розуміння їх впливу на поведінку магнітосферної та іоносферної плазми і, в кінцевому підсумку, на земний клімат, що знайшло відображення в концепції космічної погоди. З початку ХХІ сторіччя нелінійні солітонні структури в Бозе-Ейнштейнівських конденсатах (далі БЕК) інтенсивно вивчалися та спостерігалися в багатьох лабораторіях світу. Особливу роль (як з теоретичної так і експериментальній точки зору) відіграють солітони в оптичних середовищах, де вони являють собою (в якості відокремлених лазерних імпульсів) біти інформації в проєктованих надшвидкісних лініях зв'язку. Актуальність теми дисертації

В. М. Лашкіна обумовлена настійним дослідженням нелінійних структур в середовищах з дисперсією та з'ясуванню умов стійкості цих структур.

Дисертація складається з вступу, шести розділів та висновків та переліку посилань з 305 найменувань. Кожний розділ основної частини закінчується висновками, у яких сформульовані основні результати, отримані в цьому розділі. У **вступі** передусім висвітлено обрuntuвання теми досліджень та наукова новизна отриманих результатів.

**Перший розділ** дисертації присвячено застосуванню методу зворотної задачі розсіювання (МЗЗР) для повністю інтегровних одновимірних рівнянь, саме для дефокусуєчого нелінійного рівняння Шредингера (НРШ), деривативного НРШ та модифікованого НРШ, при наявності зовнішніх збурень. Автор дисертації вирішив цілу низку фізичних задач, які приводять до цих рівнянь з важливими доданками у вигляді збурень. Так для дефокусуєчого НРШ, якому відповідають неспадаючі на нескінченості граничні умови, теоретично передбачено ефект безпорогового виникнення "темних" солітонів на відміну від звичайних солітонів у фокусуєчому НРШ. При врахуванні збурення у вигляді лінійного накачування і нелінійного поглинання у оптичному волоконному світловоді обчислено спектральний розподіл випромінювання, який випускається солітоном та просторовий розподіл випромінюваного поля. Тут же розглянуто односолітонний імпульс з випадковим початковим збуренням, що фізично відповідає флуктуації, викликану спонтанною емісією фотонів в оптичних підсилювачах.

Деривативне НРШ описує розповсюдження нелінійних альфвенівських хвиль у плазмі. Автором дисертації вперше знайдено N-солітонні розв'язки деривативного НРШ без збурень з неспадаючими граничними умовами. Так само, як і для розглянутого вище дефокусуєчого НРШ, отримано еволюційні рівняння для матриці розсіювання у присутності збурень, з якого впливають рівняння для дискретних (солітонних) та неперервних даних розсіювання (випромінювання). Причому розглядаються як спадаючі, так і неспадаючі граничні умови. В останньому випадку спектральна задача помітно



ускладнюється. Розглянуті випадки збурень у вигляді дифузійного типу (а саме кінцеву провідність плазми за рахунок зіткнень), нелінійне згасання Ландау, флуктуацій густини плазми. Цікаво відмітити, що "темний" альфвенівський солітон для збурення дифузійного типу (згасання) існує набагато довше ніж світлий солітон з такими ж швидкостями та амплітудами.

У цій же моделі розглянута еволюція обмеженого в просторі початкового розподілу збурення магнітного поля, що приводить до виникнення альфвенівських солітонів. При цьому виникають солітони трьох типів: бризери, "темні" та "світлі" солітони.

У цьому ж розділі за допомогою розвинутого формалізму досліджено модифіковане НРШ зі спадаючими граничними умовами із випадковим збуренням (флуктуації показника заломлення світловода).

У **другому розділі** вивчаються нелінійні структури в магнітоактивній плазмі поблизу верхньогібридного та іонно-циклотронного резонансів та в плазмі (без зовнішнього магнітного поля) з електронним пучком.

Верхньогібридні хвилі часто спостерігаються як в космічній так і в лабораторній плазмі. Вони можуть збуджуватись за рахунок пучкових нестійкостей, конверсії незвичайної електромагнітної хвилі в області верхньогібридного резонансу, тощо. Одновимірна теорія нелінійних верхньогібридних хвиль, які взаємодіють з низькочастотними магнітозвуковими, була відома раніше, але актуальною була побудова двовимірної нелінійної теорії (одночасно з урахуванням кінетичного характеру магнітозвукової хвилі) та знаходження двовимірних нелінійних верхньогібридних структур паралельно з вивченням умов їх стійкості. Ця задача успішно вирішена автором дисертації. Так отримано двовимірні нелінійні рівняння з скалярною і векторною нелінійністю. Детально проаналізована лінійна стадія модуляційної нестійкості. Отримано чисельні розв'язки у вигляді фундаментального (основний стан) солітона та мультисолітонів (дипольного, квадрупольного, двогорбого), а також вихрових солітонів. Строго доведено відсутність колапсу та чисельно

підтверджено існування стійкого фундаментального солітона, який не колапсує, а співіснує з турбулентним оточенням.

Автором запропоновано нове еволюційне рівняння, яке описує короткохвильові, з характерною довжиною, меншою за іонний ларморівський радіус, нелінійні хвилі поблизу іонно-циклотронного резонансу. Характерною рисою цього нелінійного рівняння є залежність лінійної дисперсії у вигляді оберненої залежності частоти від хвильового вектору. У одновимірному випадку проаналізовано модуляційну нестійкість та отримано аналітичні розв'язки у вигляді "світлих" та "темних" солітонів, ударних хвиль, нелінійних періодичних хвиль.

Електронний пучок в плазмі є додатковим фактором нерівноважності – резонансна (з власними коливаннями) або нерезонансна нестійкість може бути вже в лінійному наближенні. Автором запропоновано нелінійні рівняння для системи плазма-пучок та знайдено аналітичний розв'язок у вигляді нелінійних періодичних хвиль (ланцюжка солітонів), який відповідає автостабілізації лінійної нестійкості. На мою думку, важливим є те, що знайдені розв'язки пояснюють спостереження в експерименті "швидких" солітонів, тобто з швидкістю, близькою до швидкості пучка, яка набагато більша за швидкість іонного звуку, і які не пояснюються раніш відомими теоріями.

**У третьому розділі** досліджуються дрейфові вихори та зональні течії які виникають у плазмі, що перебуває в зовнішньому магнітному полі, при врахуванні градієнтів рівноважної густини плазми й/або електронної температури.

Дрейфові хвилі в плазмі описуються двовимірним нелінійним рівнянням Хасегави-Міми, а також його узагальненнями для дрейфово-альфвенівських, дрейфово-нижньогібридних хвиль та ін. В геофізиці це рівняння відоме як рівняння Чарні. Аналітичний двовимірний розв'язок рівняння Чарні називають модоном Ларичева-Резніка. Автор дослідив розсіювання та захоплення квазілінійних дрейфових хвиль модоном. Найбільш цікаво



запропоновано автором дисертації узагальнення рівняння Хасегави-Міми на тривимірний випадок, при цьому воно стає анізотропним. Автором знайдено цікавий аналітичний розв'язок цього рівняння, і чисельно показано, що для зіткнення таких тривимірних модонів (так і для двовимірних модонів Ларичева-Резніка) можуть бути абсолютно пружними (так, як, наприклад, одновимірних солітонів рівняння Кортвега-де Фриза.)

Що стосується зональних течій, то наразі вважається загально прийнятним, що зональні течії (азимутально симетричні моди, які залежать тільки від радіальної координати в геометрії токамаку) відіграють критичну роль у регулюванні нелінійної еволюції дрейфових нестійкостей у токамаках, і, таким чином, рівня турбулентного транспорту. Зокрема, відомо, що L-N перехід (перехід до поліпшеного утримання плазми) пов'язаний з виникненням зональних течій, які пригнічують турбулентні флуктуації та призводять до виникнення внутрішніх транспортних бар'єрів. Автор дисертації успішно вирішив ряд задач по стабілізації, виникнення зональних течій та впливу на них лінійних нестійкостей, обумовлених градієнтом електронної температури, так званих ETG мод, які обумовлюють аномальний перенос тепла та частинок по електронному каналу.

**Четвертий розділ** присвячено знаходженню двовимірних нелінійних структур в середовищах з нелокальною нелінійністю та з'ясуванню умов стійкості цих структур. Чисельно знайдено стійкі двовимірні дипольні солітони в моделі НРШ з нелокальним гауссовським відгуком, а також двовимірні необертові дипольні, трипольні й квадрупольні солітони, обертові дипольні й квадрупольні солітони в моделі слабоіонізованої плазми з нелокальною тепловою нелінійністю. Показано, що необертові дипольні, обертові дипольні й квадрупольні солітони можуть бути стійкими в певному діапазоні параметрів. Детально досліджено нелінійні структури у двовимірній моделі рівняння Гросса-Пітаєвського, який описує БЕК з локальною та нелокальною взаємодією між атомами в млиноподібній конфігурації БЕК.

В п'ятому розділі вивчаються так звані двовимірні та тривимірні азимутонні солітони, які є проміжним станом між радіально симетричними вихоровими солітонами та необерттовими мультисолітонами в моделі НРШ з утримуючими потенціалом. На відміну від вихорових солітонів, фаза азимутонних солітонів є нелінійною функцією полярного кута, а амплітуда не має радіальної симетрії. Азимутони, як і радіально симетричні вихори, несуть ненульовий кутовий момент. З іншого боку, азимутони нагадують необерттові мультисолітони з більш ніж одним піком в амплітуді. Можна відмітити факт стійкості тривимірних азимутонів з двома піками у присутності досить сильного початкового шумового збурення. Причому, звісно, зовнішній потенціал запобігає колапсу (при досить малих амплітудах азимутона).

**Шостий розділ** присвячено нелінійним векторним структурам в двокомпонентних БЕК в моделі двовимірних зчеплених НРШ з зовнішнім потенціалом, тобто для двох хвильових функцій кожного сорту атомів. Пріоритетним є знаходження автором дисертації станів солітон-азимутон та азимутон-азимутон та умов їх стійкості.

Проте є і деякі зауваження:

1. Вихори і солітони, розглянуті в дисертації, очевидно мають спостережувані фізичні прояви. В той же час це недостатньо проілюстровано посиланнями на експерименти (зокрема, на дані космічних спостережень), де вони можуть бути верифіковані.
2. В дисертації розвинуті моделі реальних фізичних процесів. Однак хотілося б побачити умови застосовності отриманих нелінійних рівнянь в рамках розглянутих конкретних задач.
3. Розділи 5 і 6, незважаючи на очевидну важливість результатів (особливо щодо структури азимутонів), деталізовані недостатньо.



4. В дисертації автором розглядаються двовимірні верхньогіоридні хвилі, хоч насправді вони тривимірні. Варто було б уточнити умови застосовності двовимірного підходу.

Результати дисертації вчасно й у повному об'ємі опубліковані в 27 статтях у провідних фахових наукових журналах (наприклад в Phys. Rev. A, Phys. Rev E 11, з них 8 без співавторів), апробація результатів дисертації також представлена достатньо, вони доповідалися на численних конференціях та семінарах. Наукові результати, представлені в дисертації В. М. Лашкіна, широко відомі науковій громадськості та добре цитуються - згідно Google Scholar стаття [15] (за авторефератом) цитувалася 135 раз, стаття [13] 66 раз. Автореферат дисертації повністю відображає зміст і результати дисертації. Результати дисертації мають достатню практичну цінність і можуть застосовуватися при проведенні подальших теоретичних досліджень і при плануванні експериментів передусім в області фізики плазми, нелінійної оптики, а також при дослідженні Бозе-Ейнштейнівських конденсатів.

Враховуючи актуальність теми дисертації, обсяг проведених досліджень, рівень і кількість публікацій та новизну отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота "Стійкі нелінійні когерентні структури в диспергуючих середовищах" повністю відповідає всім вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор **Лашкін Володимир Михайлович**, без сумніву, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,

заступник директора з наукової роботи

Інституту космічних досліджень НАН України

та ДКА України



О. К. Черемних