

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

На правах рукопису

УДК 523:533.9

КУЧЕРЕНКО ВАЛЕРІЙ ПАВЛОВИЧ

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРАЦІЇ КІНЕТИЧНИХ  
АЛЬВЕНІВСЬКИХ ХВИЛЬ У КОСМІЧНІЙ ПЛАЗМІ

01.03.03 – геліофізика і фізика сонячної системи

01.04.02 – теоретична фізика

Авторферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізикоматематичних наук

КИЇВ – 1994



00778608 (-)

Робота виконана у Головному  
Академії наук України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор А. К. Духимук

Офіційні опоненти:

член-кореспондент АН України, доктор фізико-математичних  
наук, професор П. І. Фомін;

доктор фізико-математичних наук А. В. Степанов.

Провідна організація:

Інститут земного магнетизму, Іоносфери та розповсюдження  
радіохвиль Російської Академії наук.

*17 червня*

Захист відбудеться *15* ~~15~~ *квітня* 1994 року на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 016.14.01 при Головні астрономічній обсерваторії Академії наук України (252127, м. Київ, Голосіїво), початок засідання о 12 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотечі Головної астрономічної обсерваторії Академії наук України.

Автореферат розісланий *"17"* *червня* 1994 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої ради  
кандидат фізико-математичних  
наук

Н. Г. Гусева

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальність.

Незважаючи на безсумнівні успіхи, що були досягнуті при застосуванні лінійної теорії, нелінійність відгуку плазми на електромагнітні збурення все частіше змушує дослідників виходити за рамки лінійного наближення для інтерпретації спостережуваних ефектів.

Такі фізичні процеси, як трансформація та дисипація енергії хвиль у космічній плазмі, перенос енергії по спектру у просторі хвильових векторів та інші проблеми зв'язані з нелінійною взаємодією хвиль. Одним з ефективних нелінійних механізмів взаємодії хвиль являється параметрична трихвильова взаємодія, що останнім часом привертає все більшу увагу. І хоча трихвильова взаємодія достатньо добре вивчена, нелінійна взаємодія кінетичних альвенівських хвиль (КАХ) вивчена недостатньо повно. При дослідженні альвенівських хвиль як правило нехтують впливом кінетичних ефектів на їх властивості. Однак для альвенівських хвиль з достатньо малими поперечними по відношенню до магнітного поля масштабами довжин хвиль принципово важливим виявляється урахування впливу геллових рухів на їх дисперсійні властивості. На відміну від МГД альвенівських хвиль, групова швидкість КАХ може суттєво залежати від поперечних масштабів хвиль. Тому хвильова енергія КАХ може переноситись як вздовж, так і впоперек магнітного поля. Характерною особливістю КАХ являється також присутність продольних електричних полів, що приводить до ефективної дисипації хвильової енергії за рахунок затухання Ландау. Таким чином, завдяки кінетичним властивостям КАХ можуть відігравати важливу роль у

характерних для космічної плазми процесах трансформації та дисипації енергії хвиль, нагріву та дифузії частинок, релаксації надальвенівських потоків. Вони також можуть викликати значне збільшення в'язкості плазми, впливати на процеси злиття та розпаду хвиль. КАХ приймають участь в формуванні таких нелінійних структур, як солітони і ударні хвилі, що спостерігаються у сонячному вітрі.

Вплив поздовжних електричних полів на динамічні процеси в магнітосфері Землі добре відомий. У більшості ж досліджень по фізиці Сонця поздовжним електричним полем нехтують через вельтенські значення електропровідності вздовж силових ліній магнітного поля. Останнім часом з'явився ряд спостережуваних даних, що вказують на існування значних поздовжних електричних полів у післяспалахових петлях, котрі так же, як і електричні поля в магнітосфері Землі, можуть грати важливу роль в динаміці сонячної плазми. Однак цим питанням не приділялося достатньої уваги і вони залишаються маловивченими. В зв'язку з цим представляють інтерес дослідження, що враховують вплив поздовжних електричних полів на плазмові явища у сонячних магнітних петлях.

### Мета роботи.

Метою даної роботи являється:

- 1) теоретичні дослідження нелінійної взаємодії КАХ;
- 2) знаходження нових механізмів генерації КАХ у космічній плазмі;
- 3) аналіз нелінійного рівняння КАХ і пошук його стаціонарних

розв'язків;

4) дослідження впливу поздовжних електричних полів на плазмові нестійкості в космічних умовах;

5) використання одержаних теоретичних результатів для аналізу даних спостережень.

#### Наукова новизна.

1) Вперше на основі кінетичної теорії вивчено збудження КАХ та низькочастотних іонно-звукових хвиль за допомогою потужної електромагнітної хвилі.

2) У наближенні дворідинної МГД проведено дослідження нелінійної трихвильової взаємодії хвиль та одержані нові канали розпаду хвиль.

3) Досліджене нелінійне рівняння КАХ і знайдено його стаціонарні розв'язки, що мають вигляд періодичних структур, солітонів та ударних хвиль.

4) Вперше проведено дослідження впливу поздовжних електричних полів на потенціальні нестійкості у післяспалахових петлях.

#### Наукова та практична значимість.

Результати досліджень можуть бути використані для:

1) побудови нелінійної теорії КАХ та їх взаємодії з іншими хвилями;

2) пояснення механізму утворення неоднорідної структури космічної плазми;

3) побудови теорії хвильового нагріву іоносферної та сонячної

плазми;

4) Інтерпретації спектрів відбитого сигналу при опроміненні Іоносфери Землі наземними радіопередавачами;

5) дослідженні неоднорідних утворень (періодичних структур, солітонів та ударних хвиль) у сонячному вітрі;

6) побудови теорії плазмових нестійкостей, що обумовлені поздовжними електричними полями в космічних умовах.

Положення, що виносяться на захист.

1. Кінетична теорія генерації КАХ та низькочастотних Іонно-звукових хвиль за допомогою потужної електромагнітної хвилі.

2. МГД теорія нелінійної трихвильової взаємодії високочастотних електромагнітних хвиль з низькочастотними модами плазми.

3. Результати досліджень нелінійного рівняння КАХ у плазмі без зіткнень (сонячний вітер).

4. Теорія потенціальних нестійкостей у післяспалахових петлях, що обумовлені поздовжними електричними полями.

Апробація роботи.

Результати дисертаційної роботи доповідалися на семінарах Відділу фізики космічної плазми ГАО АН України, на об'єднаному астрофізичному семінарі ГАО АН України, на семінарі кафедри загальної астрономії Київського університету, на міжнародному семінарі "Фізика космічної плазми" (Київ, 1993).

Основний зміст дисертації викладено у 7 наукових працях, список яких приведений у кінці автореферату.

## Структура і об'єм дисертації.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновку та списку цитованої літератури. Об'єм дисертації складає 103 сторінки (6 малюнків включно). Список цитованої літератури містить 123 назви бібліографічних джерел.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладення теперішній стан теорії нелінійної взаємодії КАХ, відмічена важливість цих процесів у космічній плазмі. Дано короткий опис ролі поздовжніх електричних полів у космічних умовах. Обґрунтовується актуальність проблеми, її наукова та практична значимість. Сформульована мета роботи та окреслені перелік задач, що розглянуті у роботі.

Перший розділ присвячено дослідженню нелінійних хвильових явищ, що виникають у космічній плазмі під дією потужної електромагнітної хвилі. Зокрема, розглянуто один з нелінійних механізмів генерації низькочастотних власних коливань замагніченої плазми. Показано, що при проходженні електромагнітної хвилі в замагніченій плазмі з'являється поправка другого порядку до функції розподілу електронів, яка суттєво впливає на діелектричну проникність та інші колективні властивості плазми. Методом інтегрування кінетичного рівняння по незбуреним траєкторіям були одержані поправки до елементів тензору діелектричної проникності, пропорціональні квадрату амплітуди хвилі накачки, для хвиль, фазові швидкості яких задовільняють умові

$s_i \ll v_\phi \ll s_e$ , де  $s_\alpha = \sqrt{T_\alpha/m_\alpha}$  - теплова швидкість частинок сорту  $\alpha = e, i$ ,  $e$  відповідає електронам,  $i$  - іонам. Як і можна було очікувати, хвиля накачки змінює не тільки дійсну частину тензора (тобто приводить до зсуву частот власних хвиль), а і уявну частину. З урахуванням скінченного значення ларморовського радіусу одержане дисперсійне рівняння для зв'язаних іонно-звукової та кінетичної альвенівської хвиль при наявності потужної електромагнітної хвилі накачки. Були знайдені розв'язки цього рівняння. Як показав аналіз виразів для уявної частини частоти хвилі, наявність електромагнітної хвилі накачки приводить до послаблення затухання низькочастотних хвиль в замагніченій плазмі, а якщо амплітуда хвилі накачки перевищує певне критичне значення - і до розвитку нестійкості. Критерій нестійкості має вигляд

$$v_0 > v_\phi \left(1 - \mu_i \frac{T_e}{2T_i}\right), \quad (1)$$

де  $v_\phi$  - фазова швидкість хвилі,  $T_\alpha$  - температура частинок сорту  $\alpha$ ,  $\mu_i = k_\perp^2 \rho_i^2$ ,  $\rho_i$  - ларморовський радіус іонів,  $v_0 = e^2 k_\parallel E_0^2 / (m_e^2 \omega_0 (\omega_0^2 \pm \omega_{ce}^2)^2)$  - швидкість, яку набувають електрони у полі хвилі накачки. Як видно з формули (1), урахування скінченності ларморовського радіусу іонів приводить до зменшення порогу нестійкості. Критичне значення електричного поля, при якому з'являється нестійкість, можна визначити по формулі

$$E_{0кр} = \frac{m_e}{e} (v_\phi c)^{1/2} (\omega_0 \pm \omega_{ce}) \left(1 - \mu_i \frac{T_e}{2T_i}\right).$$

Таким чином, було показано, що наявність дрейфу електронів

Відносно Іонів у замагніченій плазмі може приводити до збудження КАХ, які грають важливу роль в динаміці космічної плазми. Розглянута нестійкість може виникати у  $F$ -області Іоносфери при зондуванні її наземними передавачами і проявлятися у певних особливостях спектру відбитого сигналу. Крім того, під час сонячного спадаку генерується потужне радіовипромінювання, частина енергії якого може витрачатися на збудження КАХ, які, дисипуючи, нагрівають корональну плазму.

У другому розділі розглянуто нелінійні процеси у космічній плазмі, що виникають при наявності хвилі накачки, але, на відміну від розділу I, тепер рахуємо, що виконуються умови параметричної взаємодії хвилі накачки та власних мод замагніченої плазми:

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2, \quad \vec{k}_0 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2.$$

Як відомо, хвиля накачки, яка розповсюджується у плазмі, взаємодіє з флуктуаціями, що мають частоту і хвильовий вектор однієї з власних мод. У результаті взаємодії збуджуються коливання, які мають частоту та хвильовий вектор, що рівні різниці відповідних величин для хвилі накачки і флуктуації. Якщо ця частота також відповідає одному із власних коливань плазми, то за рахунок енергії хвилі накачки будуть зростати амплітуди обох власних мод. В такому випадку говорять про параметричний розпад хвилі накачки на дві власні моди плазми. Опис такого процесу можна одержати у рамках моделі дворідинної МГД, а для врахування взаємодії хвиль використати поняття пондеромоторної сили. Оскільки при усередненні по періоду збуджуваної хвилі цієї сили одержується ненульове значення, то вона може служити аналогом змушувачої сили, яка розкачує коливання на власній

частоті. Такий метод дозволяє одержати Інкремент та час розвитку параметричної розпадної нестійкості для заданої трійки взаємодіючих хвиль при певних значеннях параметрів плазми.

У даному розділі розглянуто три параметричних процеси: одномодовий розпад КАХ, розсіяння звичайної електромагнітної хвилі на флуктуаціях Іонного звуку та збудження магнітозвукових і верхньогібридних хвиль у космічній плазмі при наявності електромагнітної хвилі накачки. Що стосується розпаду КАХ, то необхідно відмітити наступні моменти. Як відомо, МГД альвенівська хвиля через особливості поляризації не здатна розпадатися на дві інші хвилі того ж типу. Однак урахування скінченності ларіоровського радіусу Іонів робить спектр хвилі розпадним, тобто дозволяє задовільнити умови параметричної взаємодії. Розглянуті у даному розділі нелінійні процеси можуть мати місце в Іоносфері Землі, коли та опромінюється потужними радіопередавачами, і у короні Сонця під час радіосплеску II та III типів.

Третій розділ роботи присвячений аналізу нелінійного рівняння КАХ. Як відомо, рівняння для основних власних мод плазми (ленгмюрівських, Іонно-звукових і магнітозвукових хвиль) при урахуванні нелінійності відгуку плазми мають стаціонарні розв'язки типу нелінійних періодичних хвиль і солітонів, що виникають у результаті конкуренції нелінійного укручення фронту хвилі та ефектів дисперсії. У роботі одержано подібні розв'язки для кінетичних альвенівських хвиль.

Спочатку було одержано нелінійне диференціальне рівняння, що відповідає закону дисперсії КАХ при врахуванні квадратичної нелінійності у вихідній системі рівнянь:

$$\frac{d^2 b}{dt^2} = \left( \Delta^2 - b^2 - \frac{1}{x^2} \left( \frac{db}{dt} \right)^2 \right) b, \quad (2)$$

де  $b = \frac{B_x}{\sqrt{2(1+\beta)}} \vartheta_0$ ,  $t = x/\rho_0$ ,  $x = k_y \rho_0$ ,

$\Delta$  - відношення зсуву частоти КАХ за рахунок нелінійності до частоти КАХ. Як видно з (2), досліджувана система з математичної точки зору еквівалентна задачі про рух частинки у полі потенціалу  $V(b)$ . Оскільки аналітичний розв'язок рівняння (2) представляє значні математичні труднощі, для виявлення загального характеру розв'язків була використана якісна теорія звичайних диференціальних рівнянь. Був побудований фазовий портрет системи, згідно з яким всі розв'язки системи були розбиті на три класи, що відповідають топологічно нееквівалентним траєкторіям фазового портрету системи: два типи нелінійних періодичних структур і розв'язок типу солітона. Різні види розв'язків відповідають різним граничним умовам, які накладаються на вихідну систему диференціальних рівнянь у часткових похідних: періодичним структурам відповідають періодичні крайові умови, а солітону -  $B_x \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \pm \infty$ . Потім був розглянутий граничний випадок рівняння (2), який, з одного боку, дозволяв виразити приблизні рішення через табульовані функції (періодичні розв'язки - за допомогою еліптичних функцій Якобі, солітон - через гіперболічні функції), а з іншого - зберігав усі характерні якісні особливості поведінки точних розв'язків. Солітонний розв'язок при цьому мав вигляд

$$\vartheta_x = x \sqrt{\frac{2\delta^2}{1+\delta^2}} \sqrt{2(1+\beta)} \vartheta_0 \operatorname{ch}^{-1}(t\delta),$$

де  $\delta = \Delta/x$ , а амплітуда солітона  $\vartheta_{y \max} = \sqrt{4(1+\beta)} \Delta \vartheta_0$ .

Потім був зроблений якісний розгляд поведінки розв'язків досліджуваного рівняння при наявності дисипації, який спирався на механічну аналогію. Було встановлено, що в такому випадку солітонний розв'язок трансформується у розв'язок типу ударної хвилі.

Таким чином, показано, що кінетичні альвенівські хвилі можуть утворювати типічний набір нелінійних стаціонарних структур: періодичні утворення, солітони і ударні хвилі. Такі структури можуть утворюватися в плазмі сонячного вітру, де, з одного боку, широко розповсюджені КАХ, а з іншого - дисипація за рахунок зіткнень настільки незначна, що дозволяє у повній мірі проявитися процесам конкуренції нелінійних та дисперсійних ефектів.

У четвертому розділі дисертації досліджується вплив позовжнього квазістаціонарного електричного поля на стійкість потенціальних коливань у космічній плазмі. У більшості досліджень плазових процесів у космосі позовжнім електричним полем нехтують через величезні значення електропровідності вздовж силових ліній магнітного поля. Однак, переоцінка ролі електричних полів у магнітосферних процесах, яка відбулася близько двох десятиліть тому, потім була так чи інакше зв'язана з більшістю досягнень у фізиці магнітосфери. Очевидно, що механізми, завдяки яким стало можливим існування позовжніх електричних полів у магнітосфері, також можуть працювати і у короні Сонця. Останнім часом з'явився ряд спостережуваних даних, що свідчать на користь такого припущення. У цьому розділі розгляд проводиться на базі кінетичної теорії. Одержане при підстановці в рівняння Пуассона розв'язків рівняння Власова

дисперсійне рівняння співпадає з дисперсійним рівнянням при відсутності електричного поля, якщо замість температури електронів  $T_e$  ввести комплексну "температуру"  $T_e' = T_e (1 + i \frac{e E_0}{k T_e})$ . Далі одержане рівняння розв'язувалось для двох діапазонів фазових швидкостей хвиль:  $v_i \ll v_0 \ll v_e$  і  $v_i \ll v_e \ll v_0$ . Виявилось, що у випадку, коли електричне поле мале ( $\frac{e E_0}{k T_e} \ll 1$ ), дійсна частина частоти хвиль повиістю співпадає з законами дисперсії для іонно-звукових та ленгмюрівських хвиль відповідно, а у виразі для уявної частини з'являється додатковий член, який зменшує затухання хвиль, а при збільшенні  $E_0$  понад певне критичне значення - і до розвитку нестійкості. Були зроблені чисельні розрахунки значень інкременту та діапазону довжин хвиль як для іонно-звукової, так і для ленгмюрівської нестійкості, при значеннях параметрів, що відповідають умовам у корональних петлях.

Таким чином, представлено у цьому розділі дослідження впливу поздовжнього електричного поля на потенціальні коливання плазми може, з одного боку, при співставленні його зі спостережуваними даними, служити непрямым свідченням наявності електричного поля, а з іншого - описати досить важливі для динаміки та енергетики корональних утворень хвильові процеси.

У висновках сформульовані основні результати дисертації.

#### Основні результати та висновки.

I. Вперше на основі кінетичного рівняння досліджено збудження зв'язаних кінетичних альвенівських та низькочастотних іонно-звукових хвиль за допомогою потужної електромагнітної

хвилі. Одержані інкременти та критерії розвитку нестійкості. Показано, що урахування кінетичних ефектів в альвенівських хвилях суттєво послаблює умову розвитку нестійкості і робить її більш реальною у космічних умовах.

2. На основі дворідинної МГД вивчено нелінійну трихвильову параметричну взаємодію КАХ. Розглянуто розпад КАХ накачки на дві інші КАХ з меншими частотами; показано, що урахування кінетичних ефектів у альвенівських хвилях суттєво впливає на процес розпаду.

3. Проведено вивчення впливу скінченості ларморовського радіусу іонів у законі дисперсії іонно-звукових хвиль на резонансний розпад звичайної електромагнітної хвилі накачки в замагніченій плазмі з малим плазмовим параметром. Показано, що при цьому стає можливим розпад звичайної електромагнітної хвилі на електромагнітну хвилю еліптичної поляризації та іонно-звукову хвилю. Знайдено вираз для інкременту параметричної розпадної нестійкості.

4. Розглянуто процес розпаду електромагнітної хвилі накачки на верхньогібридну та магнітозвукову хвилю в замагніченій плазмі з малим плазмовим параметром.

5. Проведений аналіз нелінійного рівняння КАХ показав, що за рахунок конкуренції ефектів нелінійності та дисперсії у плазмі без зіткнень КАХ можуть утворювати стаціонарні структури типу періодичних утворень або солітонів. Урахування дисипативних процесів трансформує солітоноподібне збурення у структуру типу ударної хвилі.

6. Побудовано теорію потенціальних нестійкостей, обумовлених впливом квазістаціонарного поперемного електричного поля

у плазмі полюспалахових петель з урахуванням зіткнень.  
Одержано і проаналізовано вирази для інкременту наростання  
амплітуди іонно-звукових та ленгмюрівських хвиль, а також  
для порогу нестійкості.

Основні результати дисертації надруковані у олідуючих  
роботах:

1. Кришталь А.Н., Кучеренко В.П., Юхимук А.К. Влияние электрических полей на неустойчивости в космической плазме. Институт теор. физики АН УССР. Препринт ИТФ-91-68Р. Киев, 1992. 13 с.

2. Кучеренко В.П., Юхимук А.К. Возбуждение кинетических альвеновских волн во время солнечных радиовсплесков. Кинемат. и физ. неб. тел. 1992. Т.8, №5. С.56.

3. Кучеренко В.П., Юхимук А.К. Нелинейное взаимодействие КАВ. Кинемат. и физ. неб. тел. 1993. Т.9, №3. С.41.

4. Кучеренко В.П., Юхимук А.К. Исследование нелинейного уравнения КАВ. Главная астрон. обсерват. АНУ. Препринт ГА0-93-IP. Киев, 1993. 17 с.

5. Кришталь А.Н., Кучеренко В.П., Двораж А.В. Плазменные волны в послевсплешечных петлях: о возможности генерации в рамках "стационарного сценария". Сборник трудов международного семинара "Физика космической плазмы". Киев, 6-10 июня 1993г.

6. Юхимук А.К., Кучеренко В.П. Параметрическое возбуждение магнитозвуковых и верхнегибридных волн в космической плазме. Там же.

7. Кучеренко В.П., Юхимук А.К. Распад обыкновенной электромагнитной волны в замагниченной плазме. Там же.

АВ 30.274

Підп. до друку. 14.01.84. Формат 80×34 $\frac{1}{8}$  Папір офс.  
Друц. офс. Умовн. друк. арк. 0.69 Обл.-вид. арк. 0.38 тир. 100.  
Зам. 4-190.

---

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Респіна, 4.