

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

На правах рукопису

Мальнев Вадим Миколайович

**КОЛЕКТИВНІ ТА РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ
В ВИСОКОЗБУДЖЕНИХ ГАЗАХ ТА ПЛАЗМІ З УРАХУВАННЯМ
СТРУКТУРИ МОЛЕКУЛ**

01.04.02 — теоретична фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук

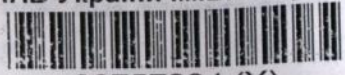
Київ - 1996

30.1

AB 36.248

Дисертація є рукописом

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00757294 (Y)

Робота виконана на кафедрі
Київського Університету імені Тараса Шевченка

Офіційні опоненти:

доктор
професор **Загородній Анатолій Глібович**,
Інститут теоретичної фізики НАН України, Київ
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник,
Токарчук Михайло Васильович,
Інститут фізики конденсованого стану
НАН України, Львів
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник,
Піскової Вілля Миколайович,
Інститут фізики напівпровідників
НАН України, Київ

Провідна організація: **Харківський державний університет**

Захист відбудеться 24 грудня 1996 року о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої ради Д 01.26 по захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук при Національному університеті ім. Т.Г. Шевченка (252022, м.Київ-22, МСП, Проспект академіка Глушкова, 6, фізичний факультет, ауд.500).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Національного університету ім. Т.Г.Шевченка (м.Київ, вул. Володимирська, 62).

Автореферат розісланий " 21 " листопада 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,
доктор фізико-математичних наук

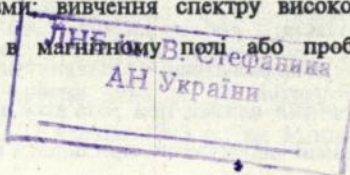
Л.В. Поперенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На початку 70-х років автором дисертації разом з С.І. Пекаром було виконано цикл робіт по дослідженню термодинамічних властивостей високозбудженого газу, що містить значний процент молекул, стаціонарно збуджених на один і той же електронний рівень [1]. Внаслідок обмінного виродження станів незбудженої та збудженої частинок між ними виникає резонансна диполь-дипольна взаємодія, яка спричиняє сильні відхилення системи від ідеальності за умов, коли незбуджений газ є практично ідеальним. Ці дослідження фактично заклали новий науковий напрямок по вивченню властивостей нерівноважних систем, що містять значну долю збуджених частинок, зокрема фотофаз речовини та переходів між ними. Цитовані роботи склали підвалини кандидатської дисертації автора. Пізніше властивості збуджених газів також вивчались іншими дослідниками і, зокрема, школою І.Р. Юхновського.

Вивчення властивостей високозбуджених газів стало актуальною задачею в зв'язку з поширенням газових лазерів та пошуків активних середовищ для них. Зокрема, дослідження впливу теплової дезактивації збуджених станів на поширення хвиль в коливно-нерівноважних молекулярних газах та вивчення систем з диполь-дипольною взаємодією обумовило напрямки подальших досліджень автора.

Метою дисертації є дослідження колективних та релаксаційних процесів в високозбуджених газах симетричних молекул та іонізованих газах поляричних або парамагнітних молекул: впливу процесів $V-T$ релаксації (трансформації нерівноважної енергії коливань молекул в енергію їх поступального руху) на дисперсійні властивості таких систем; гетерогенні процеси на стінках, що обмежують газ, за участю коливно-збуджених молекул; гетерогенну електрон-іонну рекомбінацію та розподіл її продуктів; вплив електричних або магнітних диполів молекул нейтральної компоненти на колективні властивості ізотропної та магнітоактивної електрон-іонної плазми; вивчення спектру високозбуджених станів водородоподібних атомів в магнітному полі або проблеми кулонівського діамagnetизму.



Реалізація цієї мети вимагала розв'язку низки задач:

- 1) знаходження адекватного (макроскопічного) засобу опису релаксації повільних степенів вільності ($V-T$ релаксація) в коливно-нерівноважних системах;
- 2) узагальнення теорії коефіцієнта акомодатії безструктурних частинок з метою включення внутрішніх степенів вільності молекул (коливань) в енергетичний баланс;
- 3) побудови кінетичного рівняння Больцмана для обертових степеней вільності полярних молекул в самоузгодженому полі плазми з диполями;
- 4) розвинення нових методів розв'язку рівняння Шредінгера з комбінованими потенціалами в області спектру, де стандартна теорія збурень незастосовна.

Наукова новизна та практична цінність роботи

1. Вперше розглянуто властивості коливно-нерівноважного та електронно-нерівноважно-збудженого газів як активних середовищ по відношенню до акустичних та повільних температурних збурень. Математична модель таких систем побудована на основі гідродинамічних рівнянь коливно-нерівноважного (КН) молекулярного газу, в якому підтримується стаціонарний рівень нерівноважної популяції коливань.
2. Розвинена в дисертації теорія гетерогенної релаксації коливно-збуджених молекул кількісно узгоджується з експериментальними даними.
3. Вперше поставлена задача про дослідження впливу молекул з електричними та магнітними дипольними моментами на дисперсійні властивості низькотемпературної плазми. Таку плазму будемо називати дипольною або парамагнітною. Обчислено відповідні тензори високочастотної діелектричної проникненості та досліджено власні коливання та хвилі в такій плазмі.
4. Розвинено новий метод наближеного розв'язку одномірного рівняння Шредінгера для комбінованих потенціалів, що дозволяє реалізувати аналітичні підходи до деякого класу задач, коли стандартні методи квантової механіки незастосовні. Зокрема, в дисертації отримано структуру спектру атома водню в високозбуджених станах поблизу порогу іонізації, яка узгоджується з експериментом.

Результати роботи можуть бути використані при дослідженні хвиль, що можуть поширюватися в газових нерівноважних системах та в дипольній і парамагнітній плазмі; при розв'язку задач обтікання тіл на великих швидкостях збудженими молекулами; при аналізі процесів гетерогенної релаксації збуджених

молекул та гетерогенних процесів електрон-іонної рекомбінації в пиловій та космічній плазмі; при розв'язку нерелятивістичного рівняння Шредінгера із комбінованими потенціалами у випадках, коли аналітичні наближення розв'язків невідомі.

Основні положення, що виносяться на захист

1. Теоретично доведено, що нерівноважні високозбуджені гази, які містять значну кількість коливно-збуджених симетричних молекул або метастабільних збуджених атомів, є активними середовищами по відношенню до акустичних збурень. Це положення підтверджено експериментами по спостереженню підсилення звука в газовому розряді.

2. Вперше вказано на ефект обернення другої в'язкості в коливно-нерівноважних газах. Врахування цього ефекта дозволило передбачити нові типи хвиль в високозбуджених нерівноважних газах: слабо-нелінійні поодинокі хвилі та слабо-загасаючі теплові хвилі.

3. Вперше доведено, що гетерогенна електрон-іонна рекомбінація поблизу діелектричних стінок або макрочастинок з електронними поверхневими станами може супроводжуватися утворенням нейтральних атомів в певному збудженому електронному стані.

4. Вперше доведено, що нейтральна компонента з електрично-дипольних або магнітно-дипольних молекул взаємодіє з самоузгодженим високочастотним полем та впливає на дисперсійні властивості середовища — дипольної або парамагнітної плазми.

5. Метод послідовних гамільтоніанів для знаходження енергетичних рівнів та власних функцій рівняння Шредінгера деякого класу ангармонічних осциляторів, потенціалів з двома мінімумами та комбінованих потенціалів. Хвильові функції та енергетичні рівні низьких енергетичних станів цих задач можна отримати аналітично. Метод реалізує порівняльно простий алгоритм для чисельних розрахунків високозбуджених станів.

Апробація роботи. Окремі результати дисертації доповідались на Конференції по теорії плазми, Київ, Україна, 19-23 жовтня 1971 р.; на Африканській робочій нараді по фізиці, Адіс-Абеба, Ефіопія, червень 1988 р.; на Міжнародній конференції "Physics in Ukraine", Київ, 22-27 червня 1993 р.; на Міжнародній

конференції "Plasma Physics combined with Latin American Workshop on Plasma Physics", FOZ DO IGUACU-PR-BRAZIL, October 31- November 4, 1994; на 23-ій Конференції Європейського фізичного товариства по "Controlled Fussion and Plasma Physics", Київ, 24-28 червня 1996 р.; на XXV General Assembly of International Union of Radio Science, Lille-France, August 28-September 5, 1996; 23 European Meeting on Atmospheric Studies, Kiev, Ukraine, 2-6 September, 1996; на Міжнародній конференції "Plasma Physics", Japan, Nagoya, 9-13 September, 1996.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 30 наукових публікаціях, 6 доповідях на Міжнародних наукових конференціях та авторському свідоцтві.

Особистий внесок автора полягає у виборі напрямку досліджень, постановки задач, вибору та побудови нових теоретичних методів для їх розв'язання, формулюванні та обговоренні кінцевих результатів дисертації.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, які містять оригінальні результати, заключення, висновків та списку літератури. Дисертація має 278 сторінок машинописного тексту, 7 таблиць, 4 малюнки. Список літератури включає 201 посилання.

Основний зміст роботи.

У вступі обґрунтовується актуальність досліджень та дано короткий огляд стану розглядувальних в дисертації задач, наводяться основні положення, що виносяться на захист.

Перший розділ дисертації носить назву "Колективні властивості коливно-нерівноважних газів". В ньому пропонується система гідродинамічних рівнянь для опису коливно-нерівноважних молекулярних газів симетричних молекул.

Відома ієрархія релаксаційних часів $\tau_i \approx \tau_R < \tau_v \ll \tau$, (τ з індексами i , R , v відносяться до часів релаксації поступальних, обертальних, та коливних степенів вільності молекул, τ - час V - T релаксації), дозволяє виділити в коливно-нерівноважному (КН) молекулярному газі дві підсистеми, які характеризуються відповідно рівноважною температурою газу T , що визначається кінетичними степенями вільності молекул, і нерівноважну температуру T_k , що визначає заселенність коливних рівней. Обмін енергією між цими підсистемами відбувається внаслідок повільних процесів V - T релаксації.

Системи з стаціонарним співвідношенням $T_k > T$ можна легко відтворити в лабораторних умовах. Наприклад, при електричному розряді в молекулярному

газі виникає нерівноважна заселенність коливних рівнів за рахунок непружних зіткнень електронів і молекул. Дезбудження коливань в процесі зіткнень другого роду між молекулами спричиняє неперервний потік енергії від коливних степенів вільності до кінетичних.

Система гідродинамічних рівнянь, що описують еволюцію макроскопічних величин в КН середовищі, можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla(n\bar{v}) &= 0, \\ \frac{d\bar{v}}{dt} &= -\frac{\nabla p}{m\bar{n}} + \nu\Delta\bar{v} + \left(\xi + \frac{\nu}{3}\right)\nabla(\nabla \cdot \bar{v}), \\ T \frac{ds}{dt} &= \frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{\tau} + \chi\Delta T, \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{\varepsilon_e - \varepsilon}{\tau} + q, \end{aligned} \right\} (1)$$

де n , \bar{v} , p , T - концентрація, гідродинамічна швидкість, тиск та температура молекулярного газу відповідно; m - маса молекули газу; ν - перша в'язкість або внутрішнє тертя, ξ - друга або об'ємна в'язкість (ці величини віднесені до густини газу $m\bar{n}$); χ - коефіцієнт теплопровідності газу, s - ентропія однієї частинки, що визначається кінетичними степенями вільності; ε і ε_e рівноважна та нерівноважна коливні енергії молекули; τ - характерний час V - T релаксації, q - енергія, що поглинається коливними степенями вільності молекули за одиницю часу.

Система рівнянь (1) відрізняється від рівнянь звичайної гідродинаміки наявністю джерела енергії в рівнянні балансу ентропії та додатковим рівнянням для коливної енергії молекули релаксаційного типу (останнє рівняння системи (1)).

Для того, щоб можна було скористатися системою (1), треба вибрати моделі для опису рівноважної та нерівноважної коливних енергій ε_e та ε та часу V - T релаксації τ . В дисертації вибрано найпростішу модель гармонічного осцилятора, нехтуючи ангармонізм молекулярних коливань, коли рівноважна енергія та нерівноважна енергії коливань даються формулою Планка з температурами T і T_k .

Залежність часу V - T релаксації від температури добре описується формулою Ландау-Теллера

$$\tau = \frac{const}{n} \exp(a / T^{1/3}) \quad (2)$$

де a - деяка константа, що залежить від частоти коливань молекули ω_0 та радіуса міжмолекулярної взаємодії.

Стационарний розв'язок системи (1) відповідає нерухомому газу із сталим тиском. При цьому стационарний розподіл кінетичної температури T залежить від координат і визначається розв'язку стаціонарного рівняння теплопровідності з відповідними граничними умовами. В дисертації розглядаються нескінченні циліндричні системи, що містять КН газ. Стационарний температурний режим в таких системах можна реалізувати шляхом відбору тепла із стінок циліндра. Його головною особливістю є наявність поперечного (по відношенню до вісі циліндра) градієнта температури. При слабких накачках $q\tau/T \ll 1$ (T - середня температура по перерізу циліндра) ці градієнти виявляються дуже малими для циліндрів досить великого радіусу.

Для нескінченно малих збурень системи (1) типу $\exp[i(kz - \omega t)]$ (координата z - вздовж вісі циліндра). В довгохвильовому наближенні можна нехтувати ефектами в'язкості та теплопровідності в системі (1). З лінеарізованої системи (1) одержуємо закон дисперсії

$$k = \frac{\omega}{u_\infty} \left(\frac{1 + \tilde{c}_i / c_v - i\omega\tau}{1 + \tilde{c}_i / c_p - i\omega\tau} \right)^{1/2} \quad (3)$$

де $u_\infty = \sqrt{\frac{c_p T}{c_v m}}$ - швидкість звуку за умови, коли коливні степені вільності незбуджені; T - стаціонарна температура, c_v та c_p - теплоємність кінетичних степеней вільності при сталому об'єму та тискові віднесена до однієї молекули.

Величина $\tilde{c}_i = c_i - \alpha\beta$ відіграє важливу роль при дослідженні дисперсійних властивостей коливно-нерівноважних середовищ. Тут c_k - теплоємність коливних степенів вільності однієї молекули, $\alpha = q\tau/T$ - параметр накачки, $\beta = \left| \frac{d \ln \tau}{d \ln T} \right|$.

Підкреслимо, що хвильовий вектор (3) має уявну частину, не зважаючи на те, що ефекти в'язкості та теплопровідності не враховані. Важливо, що знак його уявної частини визначається знаком \tilde{c}_i .

За умови $\tilde{c}_1 > 0$ акустичні збурення загасають, а при $\tilde{c}_1 < 0$ вони можуть наростати. Найбільш цікавою є область малих \tilde{c}_1 біля порогу нестійкості КН середовища, де можна розвинути (3) в ряд по малій величині \tilde{c}_1 і спростити закон дисперсії. Враховуючи ефекти першої в'язкості та теплопровідності, одержимо дисперсію звукових хвиль в КН газі:

$$k = \frac{\omega}{u_\infty} + i \frac{\omega^2}{2u_\infty} \left[\frac{1}{u_\infty^2} \left(\frac{4}{3} \nu + \chi \frac{c_p}{c} \right) + \frac{\tau \tilde{c}_1}{c} \right], \quad \frac{1}{c} = \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p}. \quad (4)$$

Як відомо, коефіцієнти в'язкості та теплопровідності в газі одного порядку і пропорційні до $u^2_\infty \tau_c$ (τ_c - час газокінетичних зіткнень). Маючи на увазі, що $\tau_c \ll \tau$ в широкому діапазоні температур, бачимо, що уявна частина хвильового вектора (4) в КН залежить від зовнішньої накачки і при низьких температурах $T < \hbar \omega_0$ може бути від'ємною навіть при малих параметрах накачки.

Релаксацію повільного V - T процесу в рівноважному молекулярному газі можна описати за допомогою аномально великого коефіцієнта другої в'язкості, який виявляється пропорційним до τ , а не до τ_c як у випадку першої в'язкості та теплопровідності. В дисертації узагальнено метод Леонтовича-Мандельштама [2] для знаходження коефіцієнту другої в'язкості на випадок коливно-нерівноважного газу. Цей коефіцієнт залежить від частоти звука через $\omega \tau$ і виявляється пропорційним до параметра \tilde{c}_1 . В найбільш цікавому випадку, коли $\omega \tau \ll 1$, він визначається простим співвідношенням

$$\xi = n \tau u \tau \tilde{c}_1,$$

де u — величина порядку швидкості звуку.

З цього виразу видно, що при високих температурах в рівноважному газі за умови, що коливні степені вільності є класичними, друга в'язкість співпадає з відомим результатом. В нерівноважному середовищі з ростом накачки (параметр $\alpha\beta$) друга в'язкість може змінювати знак і ставати від'ємною. Це, здавалося б, формальне узагальнення набуває важливого змісту при розв'язку деяких задач пов'язаних з надзвуковим обтіканням тіл коливно-нерівноважними газами. При цьому слід користатися звичайним рівнянням гідродинаміки (рівняння Нав'є-Стокса, друге рівняння системи (1)) з від'ємним коефіцієнтом другої в'язкості.

Отриманий закон дисперсії акустичних збурень (4) використано в дисертації для аналізу слабо-нелінійних хвиль в КН газі. Зокрема, врахування другого

доданку в уявній частині хвильового вектора k (пропорційного до \tilde{c}_k) в рівноважному газі $\alpha=0$ приводить до того, що ширина стрибка тиску в слабонелінійній ударній хвилі значно перевищує довжину вільного пробігу молекул. В нерівноважному газі з збільшенням накачки (величини $\alpha\beta$) ширина фронту ударної хвилі зменшується. При $\tilde{c}_k = 0$ вона визначається лише першою в'язкістю та теплопровідністю і стає порядку довжини вільного шляху молекул. За порогом стійкості $\tilde{c}_k < 0$ стаціонарної ударної хвилі взагалі не існує.

Можливість управління дисперсією КН газу дозволяє в вузькому діапазоні параметрів накачки подавити дисипацію, зумовлену першою в'язкістю та теплопровідністю, і зробити середовище бездисипативним. Як відомо [3], в бездисипативному середовищі можуть поширюватися слабо-нелінійні поодинокі хвилі-солітони. В дисертації знайдено профіль, та швидкість таких солітонів.

Дисперсійне рівняння для нескінченно малих збурень, що витікає з системи (1) містить також гілку власних коливань, які зветься тепловими або температурними і швидко загасають в рівноважних середовищах. В КН середовищах ситуація змінюється. Дисперсія цих хвиль в границі $\omega\tau \ll 1$ і при низьких температурах $T \ll \hbar\omega_0$ має вигляд

$$k^2 = i \frac{\omega}{\chi} \left[1 - \frac{\alpha\beta}{c_p} \left(1 + i\omega\tau + (i\omega\tau)^2 \right) \right] \quad (5)$$

Якщо параметр накачки підібрати так, щоб $\alpha\beta=c_p$, то теплові хвилі слабо затухають і поширюються з швидкістю $u = \sqrt{\chi/\tau}$, яка значно менша за швидкість звуку.

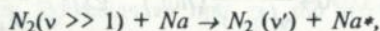
Коливна нерівноважність молекулярного газу може бути використана для управління потоками низькотемпературної плазми в потужних плазмотронах.

В низькотемпературній плазмі прийнято, що дисипативні процеси, як правило, пов'язані з зіткненнями або з першою в'язкістю. В слабоіонізованій плазмі існує додаткова степінь вільності - степінь іонізації. Її характерні часи релаксації виявляються набагато більшими за часи релаксації поступальних степенів вільності. Зсув іонізаційної рівноваги за рахунок збурень в плазмі зумовлює релаксацію цієї степені вільності. Такий процес є незворотним і супроводжується дисипацією енергії збурення, приводячи до додаткової дисперсії середовища.

На відміну від молекулярного газу плазмі властивий більш широкий спектр колективних рухів. Врахування іонізаційної релаксації дає універсальний механізм затухання, який може бути більш ефективним за механізм першої в'язкості.

Інкремент наростання дрейфово-дисипативної нестійкості пов'язан^{у.м.} з першою в'язкістю. В дисертації показано, що врахування іонізаційної релаксації дає ефективний механізм затухання та може зменшувати інкремент наростання або повністю подавляти дрейфово-дисипативну нестійкість.

В першій главі також розглянуто можливий механізм збудження лінії дублета натрію в іоносфері. Відомо, що D-шар іоносфери містить значну кількість молекулярного азота та атомів метала, зокрема, натрію. Виявляється, що енергія восьмого коливного рівня молекули азота практично співпадає з енергією першого збудженого стану атома натрію. Таким чином, в D-шарі відбувається резонансна передача енергії коливань молекул азота електронним збудженням натрія в такому елементарному процесі



де N_2 відноситься до молекул азота в коливному стані v та v' до та після зіткнення з атомом натрія, Na^* позначає атом натрія в першому збудженому стані. Ефективний переріз цього елементарного процесу виявляється близьким до газокінетичного, що зумовлює його високу ефективність. Очевидно, що цей механізм збудження натрія є додатковим до хімічного збудження, яке дає стандартний рівень випромінювання натрія в нічному небі. Відомо, що в сейсмічно активних районах над епіцентром землетрусів спостерігаються сильні збурення електричного поля та збільшення концентрації електронів та атомів натрія в D-шарі іоносфери. Електричне поле "підігріває" електрони до енергій, при яких збудження коливних рівнів азота стає ефективним. Таким чином, збільшення інтенсивності дублета натрію за рахунок резонансної передачі енергії коливань азота може бути пов'язане із збільшенням сейсмічної активності в даному регіоні.

Завершує першу главу розгляд утворення дисипативних структур в високозбудженому газі атомарного водню стандартними методами синергетики та розігрів екситонів — елементарних збуджень в твердих тілах — методом кінетичного рівняння. Екситони Ванье виникають при поглинанні світла кристалами. В неоднорідному електричному полі вони поляризуються і набувають електричного

дипольного моменту, втягуються в область сильного поля, прискорюючись та збільшуючи свою кінетичну енергію. Внаслідок цього процесу інтенсивність люмінесценції кристалів в екситонній області спектру може підвищуватися.

Другий розділ дисертації “Процеси гетерогенної релаксації в збуджених газах” присвячено розгляду релаксації коливно-збуджених молекул на стінках пристроїв, що об’єднують газ, та процесів гетерогенної електрон-іонної рекомбінації. Тут знайдено ймовірність переходів в коливному спектрі молекули при її взаємодії із стінкою, яка моделюється сукупністю гармонічних осциляторів, та обчислено коефіцієнт акомодатії двохатомного молекулярного газу. Останній визначається як відношення енергії, що передається молекулою при зіткненні з поверхнею стінки і супроводжується зміною енергії поступальних та коливних степенів вільності, до максимальної енергії, що може передати молекула.

Частина коефіцієнта акомодатії, що пов’язана із зміною коливного стану молекули, складає

$$\xi = 0.004 \frac{mT^{1/2}}{\gamma(\hbar c_s)^3} (\hbar\omega_0)^{5/2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega_0}{T_k}\right),$$

$$\hbar\omega_0 / T \gg 1, \quad \hbar\omega_0 / T_k \gg 1,$$
(6)

де m - маса молекули газу, γ - густина матеріалу стінки, c_s - швидкість звуку, T_k - температура коливань. Для типових значень параметрів формула (6) дає значення коефіцієнта акомодатії, який узгоджується з експериментальними даними.

В дисертації також обчислено характерний час релаксації нерівноважно-збудженого газу при його взаємодії з поверхнею. При не дуже великих концентраціях газу трапляється, що за час V - T релаксації частинка проходить віддаль порядку розмірів приладу, в якому знаходиться газ. В таких випадках треба враховувати гетерогенну релаксацію коливних степенів вільності молекул. Визначено характерний час гетерогенної релаксації коливань

$$\tau = 5 \cdot 10^2 \frac{V}{S} \gamma \left(\frac{c_s}{\omega_0}\right)^3 \frac{\exp\left(\frac{\hbar\omega_0}{T_k}\right)}{(m\hbar\omega_0)^{1/2}}$$
(7)

(V - об’єм газу, S - площа поверхні стінки) і проведено його порівняння з часом об’ємної V - T релаксації. Зокрема, для молекул азота та кисню гетерогенна релаксація істотня до концентрацій порядку 10^{18} см^{-3} .

Вищеописані результати були одержані в припущенні, що молекула проходить область ефективної взаємодії з поверхнею за час, значно менший характерного часу молекулярних коливань, коли $\omega_0 < v/a$ (v - швидкість молекули, a - характерна область її взаємодії з поверхнею). Ця нерівність реалізується при відносно високих температурах. При цьому деталі потенціалу взаємодії молекула-поверхня не істотні. Тому дослідження проводилося в апроксимації раптових збурень.

В області низьких температур, коли час взаємодії молекули з поверхнею виявляється більшим за період молекулярних коливань, гетерогенна релаксація набуває адіабатичного характеру. В дисертації запропоновано, що ймовірність зняття коливного збудження в цьому випадку пропорційна до модифікованого фактора Мессі

$$\exp\{-(\omega_0 - \omega_D)a / v\}, \quad (8)$$

де ω_D - дебайвська частота матеріалу поверхні. Така залежність витікає з аналізу експериментальних даних, які свідчать про те, що ймовірність гетерогенної релаксації зменшується з збільшенням частоти коливань молекули і з переходом від металічних поверхонь до діелектричних.

Розрахунки ймовірності гетерогенної релаксації коливань в цьому діапазоні температур проведено на підставі модельної відштовхувальної взаємодії між молекулою та поверхнею, яка швидко спадає з відстанню z від поверхні по закону $\sim \exp(-z/a)$. Характерні розміри області ефективної взаємодії a є параметром теорії.

Розвинена в дисертації теорія дозволяє визначити температурну залежність ймовірності гетерогенної релаксації, що близька до експериментальної, якщо врахувати можливість адсорбції молекули на поверхні. Відповідні криві мають мінімуми при деякій температурі T , що залежить від параметрів задачі і константи a . Беручи це значення T з експерименту, можна визначити a для конкретних молекули і поверхні.

На поверхні діелектричної стінки, що обмежує електрон-іонну плазму, можуть утворитися двовимірні зв'язані стани електронів. Цей двовимірний газ електронів розташовано на великих відстанях (порівняно з міжатомними відстанями в діелектрику) конденсованого середовища. Такі стани спостерігалися експериментально на поверхні рідкого гелію. Іони плазми можуть рекомбінувати

з поверхневими зв'язаними електронами. В дисертації вперше показано, що в процесі такої гетерогенної електрон-іонної рекомбінації можуть утворюватися нейтральні атоми в певному збудженому стані, що визначається властивостями поверхні (наприклад, при електрон-протонній рекомбінації на поверхні з відносно великою діелектричною проникненістю переважно утворюються атоми водню в четвертому збудженому стані). Такий ефект можна також спостерігати в пиловій плазмі, де макроскопічні частинки пилу можуть нести на собі тисячі електронів, і де інтенсивність рекомбінаційного випромінювання збуджених атомів може бути помітною.

Третій розділ дисертації “Колективні властивості дипольної і парамагнітної плазми” присвячено колективним процесам в плазмі, яка містить нейтральні несиметричні молекули з електричними або магнітними дипольними моментами. Таку плазму запропоновано називати дипольною або парамагнітною. Її можна легко створити в лабораторних умовах за допомогою газового розряду в полярному чи парамагнітному газі, або добавляючи електрично дипольні чи парамагнітні молекули в звичайну електрон-іонну плазму. Електричні диполі можуть взаємодіяти з самоузгодженим полем плазми і впливати на її дисперсійні властивості. Магнітні дипольні моменти впливають на дисперсію замагніченої плазми. Вони процесують в зовнішньому магнітному полі і можуть давати внесок в високочастотну магнітну поляризацію середовища.

Спочатку розглянуто термодинамічні функції дипольної плазми. Тут показано, що електричний диполь, що внесено в електрон-іонну плазму, збільшує енергію системи, тобто диполі виштовхуються з плазми.

Далі отримано кінетичне рівняння для обертального руху електричних диполей у самоузгодженому полі. При цьому полярна молекула моделюється сферою з моментом інерції I , в яку вмонтований точковий диполь. На високих частотах у порівнянні з частотою теплового обертання диполів ω_d можна нехтувати їх поступальним рухом. В дипольній плазмі в наближенні без зіткнень система рівнянь Власова містить кінетичні рівняння для функцій розподілу електронів, іонів і диполей, а також рівняння Максвелла для самоузгодженого поля. При низьких частотах $\omega < \omega_d$ менших за частоту теплового обертання диполів полярні молекули відіграють роль середовища з діелектричною проникненістю

$$\varepsilon = \frac{4\pi d^2 n_d}{3T} \quad (d - \text{дипольний момент молекули, } n_d - \text{концентрація диполів}).$$

В дисертації отримано вираз для високочастотного тензора діелектричної проникненості дипольної плазми і на його підставі проаналізовано власні коливання та хвилі, які можуть поширюватися в такому середовищі. Наприклад, в високочастотні границі, коли частота коливань $\omega \gg kv_{Te}$, $\omega \gg \omega_d$ (v_{Te} - теплова швидкість електронів, ω_d - теплова швидкість обертання диполів) наявність диполів приводить до зсуву в частоті Ленгмюра, а в інкременті затування Ландау з'являється адитивна добавка

$$4\pi\alpha\sqrt{\frac{\pi}{8}}\frac{\omega^2}{\Omega_e}\exp\left[-\frac{\Omega_e^2}{\omega^2}\right],$$

де Ω_e - електронна ленгмюрівська частота, $\Omega_e = \frac{4\pi d^2 n_d}{3 I}$.

Додаткове затування Ландау обумовлено резонансною взаємодією хвилі з обертаннями диполів. Суттєво, що в довгохвильовому наближенні, коли звичайне затування Ландау може бути експоненційно малим, при $\Omega_e \rightarrow \omega_d$ основний внесок в затування дає дипольна компонента. При достатній концентрації диполів ленгмюровські коливання дипольної плазми можуть бути взагалі подавлені.

Говорячи про електромагнітні хвилі в дипольній плазмі, відмітимо, що їх закон дисперсії має вигляд $\omega^2 = \Omega_e^2 + \Omega_d^2 + k^2 c^2$, а декремент затування на високих частотах повністю визначається дипольною компонентою:

$$\gamma = 4\pi\alpha\sqrt{\frac{\pi}{8}}\frac{\omega^2}{\omega_e}\exp\left[-\frac{\omega^2}{2\omega_e^2}\right].$$

В нелінійному режимі дипольна компонента слабо впливає на профіль та амплітуду поодинокій нелінійній іонно-звуковій хвилі. Однак, в дипольній плазмі вона супроводжується хвилею розрідження концентрації диполів. Напевне це пов'язано з тим, що диполі виштовкуються з плазми.

При вивченні процесів в дипольних середовищах важливо, що поступальні степені дипольної молекули є більш "інерційними", ніж обертальні. За період обертання дипольна молекула зміщується на відстань порядку її радіусу. Це дозволяє розглядати незалежно повільні процеси, пов'язані з поступальним рухом полярних молекул, та швидкі, пов'язані з їх обертанням. В дисертації одержано повну систему гідродинамічних рівнянь для газу полярних молекул в зовнішньому електричному полі, що усереднена по швидкому обертанню диполів і описує повільні процеси в полярному газі.

На підставі цієї системи проаналізовано деякі типи повільних хвиль в дипольних середовищах в довгохвильовому наближенні в неоднорідному електричному полі. Наприклад, у випадку лінійного електричного поля дисперсія низькочастотних коливань має вигляд

$$\omega_l^2 = \alpha \frac{T}{\mu} (l + 1), \quad \alpha = \frac{d^2}{3T^2} \left| \frac{dE}{dx} \right|^2, \quad l = 0, 1, 2 \dots$$

При великих l розв'язки асимптотично переходять в квазікласичні, що відповідають звуковим хвилям. При малих l вони істотно відрізняються від звукових хвиль і представляють власні поляризаційні низькочастотні коливання. Вони зумовлені взаємодією дипольного моменту одиниці об'єму середовища з зовнішнім неоднорідним електричним полем.

В дисертації також отримано систему макроскопічних рівнянь для швидких процесів $\omega \gg \omega_d$, коли поступальний рух диполів неістотний. На підставі цієї системи показано, що в дипольному середовищі існує колективна частота

$$\Omega_d = \frac{4\pi d^2 n_d}{3I}. \quad \text{Однак в газовому середовищі } \Omega_d \approx \omega_d \text{ (де } \omega_d \text{ — частота}$$

теплового обертання диполів), і ці коливання згасають навіть у відсутності зіткнень. Вони можуть існувати в полярних кристалах, де $\omega_d \ll \Omega_d$ і питання про затухання Ландау не виникає.

Завершує третій розділ розгляд колективних властивостей парамагнітної плазми - магнітоактивної електрон-іонної плазми з домішками парамагнітних молекул з постійними магнітними моментами. Одержано тензор діелектричної проникненості парамагнітної плазми та проаналізовано можливі типи колективних мод та хвиль, що існують в цьому середовищі. В парамагнітній плазмі з'являється нова характерна частота ω_0 (парамагнітна мода), що пов'язана з прецесією диполів в магнітному полі.

Найбільш цікавим є випадок, коли частота парамагнітної моди близька до частоти відповідної плазмової хвилі $\omega_0 = \omega_p(k)$. Поблизу хвильових векторів, які є розв'язками цього рівняння, парамагнітна та плазмова моди будуть змішуватися.

В дисертації проведено аналіз трансформації хвиль [4] поблизу резонансів плазмових хвиль та парамагнітної моди. Зокрема, в довгохвильовому наближенні в парамагнітній плазмі можливі так звані повільні електромагнітні хвилі. Групова швидкість цих хвиль не залежить від хвильового вектора і виявляється значно

меншою швидкості світла. Вони існують як пара хвиль з нормальною і аномальною дисперсією. Такі хвилі можуть існувати також в плазмі твердих тіл з парамагнітними домішками. Їх взаємодія з поперечними звуковими хвилями може привести до нових фізичних ефектів.

Четвертий розділ дисертації “Проблема кулонівського діаманетизму та метод послідовних гамільтоніанів” дисертації починається з аналізу задачі про кулонівський діаманетизм - рух електрона в полі точкового заряду та магнітному полі. Недавні експерименти показали наявність регулярної структури в спектрі високозбуджених станів атома водню в зовнішньому магнітному полі поблизу порога іонізації, де слід чекати складного переплетіння високовироджених рівнів під дією магнітного поля.

Відомо [5], що високозбуджені або рідбергівські стани електронів в атомах можна розглядати як водородоподібні, локалізовані на практично плоских орбітах. Тому в дисертації спочатку використовувалась двовимірна модель задачі. Радіальне рівняння Шредінгера після відокремлення кутової залежності хвильової функції $\sim e^{im\varphi}$ набуває вигляду

$$R'' + \frac{1}{\xi} R' + \left(\gamma - \frac{m^2}{\xi^2} + \frac{\alpha}{\xi} - \xi^2 \right) R = 0, \quad (9)$$

де нерозмірна координата ξ вимірюється в осциляторних одиницях

$$\left(2\hbar / \mu\omega_c \right)^{1/2}, \quad \gamma = \frac{4E}{\hbar\omega_c} - 2m, \quad \alpha^2 = \frac{8\mu e^4}{\hbar^3\omega_c}, \quad \omega_c = \frac{eB}{\mu c}, \quad \mu, e - \text{ маса та заряд електрона відповідно, } B - \text{ магнітне поле.}$$

Потенціальна енергія в рівнянні Шредінгера (9) являє собою комбінацію кулонівського $\sim 1/\xi$ та гармонічного потенціалів $\sim \xi^2$.

Будемо шукати розв'язки (9) в вигляді, що враховує в явній формі асимптотики задач гармонічного осцилятора (рух електрона в магнітному полі) та атома водню (рух електрона в полі протона)

$$R = \xi^{|m|} e^{-\frac{\xi^2}{2} - \beta\xi} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \xi^n, \quad (10)$$

де β є невідома величина. Після підстановки (10) в рівняння Шредінгера одержимо рекурентне співвідношення, яке пов'язує зразу чотири послідовних коефіцієнта. На даний час не існує регулярних методів розв'язків таких рівнянь.

В роботах автора було запропоновано штучний прийом (conjecture), який дозволив отримати вираз для енергії електрона поблизу порога іонізації, що описує квазі-рівні Ландау – систему еквідистантних рівнів, відстань між якими

$$\Delta E = \frac{3}{2} \hbar \omega_c \quad (\omega_c - \text{циклотронна частота}).$$

Цей прийом можна вважати феноменологічним підходом, який виходить з необхідності зберегти розв'язки задач атома водню та електрона в магнітному полі і полягає в тому, що a_k коефіцієнт в відповідній рекурентній формулі не дає внеску в a_{k+2} та в a_{k+1} . Однак, хвильова функція тепер представляється нескінченим рядом і питання про її квадратичну інтегрованість лишається відкритим.

Для розв'язання цього питання в дисертації запропоновано метод послідовних гамільтоніанів, який використовує базис нормованих функцій, що відомі як квазіточні розв'язки (КТР). Вони є аналітичними розв'язками одномірного рівняння Шредінгера для деяких складних потенціалів, що з'являються при спеціальних або квантованих константах зв'язку.

Найбільш простим прикладом КТР є розв'язки рівняння Шредінгера для потенціальної ями з двома мінімумами $V = -\xi^2 + \beta^2 \xi^6$. Відповідне рівняння Шредінгера

$$\psi'' + (\varepsilon + \xi^2 - \beta^2 \xi^6) \psi = 0 \quad (11)$$

після підстановки розв'язку у вигляді $\psi \sim \exp(-\beta \frac{\xi^4}{4}) \sum_{n=0}^{\infty} a_n \xi^n$ приводить до рекурентного співвідношення, що зв'язує три коефіцієнти. Розв'язки у вигляді поліномів можна отримати, якщо вимагати

$$a_k \neq 0, \quad a_{k+2} = a_{k+4} = 0. \quad (12)$$

Ці рівняння дозволяють знайти власні значення енергії та накладають обмеження на константу зв'язку $\beta = 1/(2k+3)$, $k=0, 1, 2, \dots$ При довільних k поліноміальні розв'язки відсутні. Прийнято, що існує тісний зв'язок між деякими представленнями групи $SL(2, R)$ та наборами КТР. Такі розв'язки рівняння Шредінгера (11) детально проаналізовані в дисертації і використані для обчислення розщеплення (відстань між основним та першим збудженим станом) та спектру енергій при довільних β .

Тривалий час вважалося, що КТР представляють академічний інтерес, оскільки існують лише для потенціальних ям з фіксованими параметрами.

В дисертації вперше доведено, що використання КТР може бути значно розширено. Квазіточні розв'язки утворюють основу метода послідовних гамільтоніанів (ПГ), який розвинено автором для розв'язання рівняння Шредінгера для комбінованих потенціалів, деякого класу ангармонічних осциляторів та потенціальних ям з декількома мінімумами.

Ідея метода послідовних гамільтоніанів (ПГ) полягає в доповненні потенціальної енергії вихідного гамільтоніану таким чином, щоб відповідне рівняння Шредінгера мало поліноміальні розв'язки. При цьому в гамільтоніан вноситься симетрія, яка і приводить до появи КТР. Суттєво, що в багатьох задачах константа зв'язку при доданку, що введено до вихідного гамільтоніану, зменшується із збільшенням степеня поліномів КТР. Тобто послідовність гамільтоніанів H_k при $k \rightarrow \infty$ (ступінь полінома КТР) прямує до гамільтоніану вихідної задачі, а хвильові функції та власні значення до відповідних точних розв'язків.

Реалізацію методу ПГ проілюструємо на прикладі ангармонічного осцилятора $V = bx^4$. Після введення доданка $\sim x^6$ в гамільтоніан задачі отримуємо допоміжне рівняння Шредінгера

$$\psi'' + (\varepsilon - \xi^4 - \beta^2 \xi^6) \psi = 0,$$

яке має квазіточні розв'язки при спеціальних значеннях константи зв'язку β^2 .

Розв'язок рівнянь (12) в цьому випадку знову дає власні значення енергії та константу зв'язку, яка має вигляд

$$g_k = \beta^2 = \frac{1}{(4[2k+1])^{2/3}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Легко бачити, що g_k монотонно спадає з ростом k , а відповідна послідовність рівнянь Шредінгера прямує до рівняння для ангармонічного осцилятора $\sim \xi^4$.

Власні значення енергії $\varepsilon(g_k)$ прямують до точних енергетичних рівнів осцилятора ξ^4 зверху. Ця властивість послідовності КТР притаманна розв'язкам всіх проблем, які розглянуто в дисертації. Рівняння $a_{k+2} = 0$ при малих k можна розв'язати аналітично. Але навіть малі k дозволяють отримати гарні оцінки енергетичних рівнів осцилятора ξ^4 , як це видно з таблиці 1, де наведено послідовність значень п'яти енергетичних рівнів при різних k (для непарних рівнів брали $k+1$) та точні значення.

Користуючись методом послідовних гамільтоніанів, в дисертації розглянуто потенціал $V = ax^2 + bx^4$ з $a > 0$ та $a < 0$, коли він перетворюється на потенціальну яму з двома мінімумами. В обох випадках до цього потенціалу додається додатак $\sim x^6$. Константа зв'язку g_k виявляється монотонно спадаючою функцією k . Отримані власні значення енергії та величина розщеплення в випадку $a < 0$ добре узгоджується з результатами інших авторів.

Метод послідовних гамільтоніанів було також застосовано до розв'язку радіального рівняння Шредінгера двовимірної та тривимірної задач кулонівського діамagnetизму.

Таблиця 1.

Оцінки зверху перших чотирьох енергетичних рівней та рівня $n=100$ ангармонічного осцилятора ξ^4

	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{100}
0	1.14471	4.07163	-	-	-
10	1.08498	3.90233	7.72146	12.1184	-
100	1.06637	3.82612	7.52176	11.7694	1107.09
1 000	1.06187	3.80553	7.47029	11.6725	1042.34
10 000	1.06064	3.80094	7.45885	11.6508	1025.76
800 000	1.06038	3.79974	7.45586	11.6451	1021.25
Точні значення	1.06036	3.79967	7.45570	11.6447	1020.99

(Для непарних рівнів треба брати значення $k+1$)

Гамільтоніан, що відповідає рівнянню Шредінгера двовимірної задачі (9) зручно представити в вигляді

$$H = -\left(\frac{d^2}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi}\right) + \frac{m^2}{\xi^2} - \frac{2}{\xi} + \frac{\alpha^2}{4} \xi^2 \quad (13)$$

тут ξ вимірюється в борівських радіусах, $\alpha = \hbar\omega_c / Ry$.

Послідовність гамільтоніанів для цієї задачі будується на підставі існування поліноміальних КТР допоміжного гамільтоніана

$$\bar{H} = H + 2\gamma\lambda\xi^3 + \lambda\xi^4, \quad (14)$$

де допоміжні константи зв'язку γ та λ виявляються додатніми, малими за умови $\alpha \ll 1$ і монотонно спадаючими з ростом степені поліномів КТР.

Будемо шукати власні функції гамільтоніана (14) у вигляді

$$\bar{R} = \xi^{|m|} \exp\left[-\left(\beta\xi + \gamma\frac{\xi^2}{2} + \lambda\frac{\xi^3}{3}\right)\right] \times \sum_{n=0}^{\infty} a_n \xi^n.$$

З відповідного рівняння Шредінгера після накладання умови $\gamma^2 + 2\beta\lambda = \frac{\alpha^2}{4}$ отримаємо рекурентне співвідношення, яке зв'язує чотири послідовних коефіцієнта a_n . З умови існування поліноміальних розв'язків

$$a_k \neq 0, a_{k+1} = a_{k+2} = a_{k+3} = 0$$

дістанемо систему рівнянь для визначення власних значень енергії гамільтоніана (14), параметра β та констант зв'язку γ і λ . Для низьких рівней енергії вони можуть бути розв'язані аналітично, а для високих - потребують чисельного аналізу. Зауважимо, що аналітичні розв'язки відтворюють результати теорії збурень в відповідних границях.

Результати чисельних обчислень для великих квантових чисел $n = k + |m|$ і m приведені в таблиці 2, де представлені рівні енергії плоскої задачі кулонівського діамagnetизму $E = E_{nm}$ та відстань між сусідніми рівнями енергії $\Delta E = E_{n+1, m+1} - E_{nm}$ в одиницях $\hbar\omega_c$ для двох значень параметра α .

Таблиця 2.

$\alpha = 2,5 \times 10^{-5}$				$\alpha = 5 \times 10^{-5}$			
n	m	E	ΔE	n	m	E	ΔE
43	13	3.612	-	34	10	2.705	-
42	12	2.127	1.485	33	9	1.216	1.49
41	11	.617	1.51	32	8	-.3055	1.52
40	10	-.921	1.54	31	7	-1.865	1.56
39	9	-2.49	1.57	30	6	-3.467	1.6
43	12	3.112	-	34	9	2.205	-
42	11	1.627	1.485	33	8	.716	1.49
41	10	.117	1.51	32	7	-.8055	1.52
40	9	-1.421	1.54	31	6	-2.365	1.56
39	8	-2.99	1.57	30	5	-3.97	1.6
43	11	2.612	-	34	8	1.705	-
42	10	1.127	1.485	33	7	.216	1.49
41	9	-.383	1.51	32	6	-1.3055	1.52
40	8	-1.921	1.54	31	5	-2.865	1.56
39	7	-3.49	1.57	30	4	-4.467	1.6

З Таблиці 2 видно, що поблизу порогу іонізації відстань між сусідніми рівнями ΔE близька до $\frac{3}{2}\hbar\omega_c$. Більш детальний аналіз показує, що густина рівнів в цій ділянці спектру дається формулою

$$\left(\frac{\Delta E}{\hbar\omega_c}\right)_{E=0} = \Delta n + \frac{1}{2}\Delta m.$$

Таким чином, відтворюється основна риса спектру атомів водню в магнітному полі, або квазі-рівні Ландау проблеми кулонівського діаманетизму $\Delta E = q \frac{\hbar\omega_c}{2}$ (q - непарне число).

В дисертації розглянуто також тривимірну задачу кулонівського діаманетизму. Типово, що квазі-рівні Ландау відтворюються також і в тривимірній задачі.

ВИСНОВКИ

1. На основі системи гідродинамічних рівнянь коливно-нерівноважного (КН) молекулярного газу, в якому підтримується стаціонарний рівень популяції коливань молекул за рахунок зовнішньої накачки, розглянуто підсилення звукових хвиль в КН середовищі та знайдено відповідний інкремент.

2. Показано, що процеси повільної V - T релаксації (передачі нерівноважної коливної енергії поступальному руху молекул) можуть бути описані макроскопічно в термінах другої в'язкості аналогічно до того, як це прийнято в рівноважних середовищах. З ростом нерівноважності коливань друга в'язкість може міняти знак, ставати від'ємною та приводити до підсилення звука за рахунок нерівноважної енергії, що запасена в коливних степенях вільності молекул.

3. Зміниючи рівень нерівноважності коливань за допомогою зовнішнього джерела енергії, можна впливати на дисперсійні властивості коливно-нерівноважного середовища. Зокрема, при певному рівні нерівноважності в молекулярному газі можуть поширюватися слабконелінійні солітони та слабкозагасаючі теплові хвилі, що не мають аналогів в рівноважних газах.

4. Нерівноважну енергію коливань молекул можна використати для керування плазмою в сучасних потужних плазмотронах, коли потужне звукове поле може впливати на турбулентні потоки низькотемпературної плазми.

5. Резонансна передача коливної енергії азота електронному збудженню атома натрія повинна приводити до збільшення інтенсивності дублета натрія. Таке збільшення випромінювання із D-шару нічної іоносфери можна пов'язати із збільшенням сейсмічної активності в даному регіоні.

6. Обчислено коефіцієнт акомодатії коливно-збудженої молекули при її взаємодії із стінкою, що обмежує газ, і знайдено характерний час гетерогенної релаксації коливних збуджень. Одержано критерії, за яких гетерогенна релаксація домінує у порівнянні з об'ємною.

7. Встановлено, що нейтральні атоми, які утворюються в процесі гетерогенної електрон-іонної рекомбінації, повинні бути в певному збудженому стані, що залежить від енергії зв'язаного поверхневого стану електрона. Цей ефект повинен приводити до появи відповідної лінії в спектрі рекомбінаційного випромінювання і може спостерігатися у пиловій плазмі.

8. Досліджено колективні властивості дипольної і парамагнітної плазми, що містить молекули з електричними або магнітними дипольними моментами як нейтральну компоненту. Ці молекули можуть взаємодіяти з високочастотним самоузгодженим полем і впливати на дисперсійні властивості плазми. Зокрема, в дипольній плазмі можна подавити ленгмюрівські коливання при достатній концентрації молекул з електричними дипольними моментами.

9. Сформульовано рівняння для гідродинамічного опису високочастотної поляризації полярних середовищ, що обумовлена обертанням дипольних молекул, і пов'язаних з цим механізмом процесів.

10. Розвинено метод одержання послідовних наближених розв'язків рівняння Шредінгера або метод послідовних гамільтоніанів. Він полягає в доповненні потенціальної енергії гамільтоніана вихідної задачі таким чином, щоб відповідне рівняння Шредінгера набувало поліноміальних квазіточних розв'язків при певних або квантованих значеннях констант зв'язку. Суттєво, що із збільшенням степені поліномів ці константи зв'язку монотонно зменшуються, а послідовність гамільтоніанів прямує до гамільтоніана вихідної задачі. При цьому рівні енергії та власні значення відповідно прямують до розв'язків вихідної задачі.

11. За допомогою метода послідовних гамільтоніанів одержано наближений розв'язок проблеми кулонівського діаманетизма, що містить опис області спектра, яка відповідає квазі-рівням Ландау; одержано енергетичні рівні і власні

функції деяких ангармонічних осциляторів; обчислено розщеплення енергетичних рівней частинки в потенціальних ямах з двома мінімумами. Ці результати добре узгоджуються з експериментом (кулонівський діамagnetизм) і численними обчисленнями (складні потенціали).

Цитована література:

1. Пекар С.И. Избранные труды. К.Наукова Думка. 1988.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М., Наука. 1988.
3. Лифшиц Е.Я., Питаевский Л.Р. Физическая кинетика. М., Наука. 1979.
4. Ситенко О.Г., Мальнев В.М. Основы теории плазмы. К.,Н. Думка. 1994.
5. Kleppner D., Littman M.G., and Zimmerman M.L. "Coulomb-diamagnetic problem" in Rydberg states of Atoms and Molecules. Cambridge University Press. Cambridge. 1983. P.73-116.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Коган Ю.Я., Мальнев В.М. Про коливні властивості коливного газу // УФЖ. 1975. Т. 20. № 11. С. 1761-1767.
2. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Распространение звука в колебательно-возбужденном газе // ЖТФ. 1977. Т. 47. № 3. С. 653.
3. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. О влиянии ионизационной релаксации на распространение волн в низкотемпературной плазме // Физика плазмы. 1977. Т. 3. В. 4. С. 855-858.
4. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Коэффициент аккомодации двухатомного, молекулярного газа // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. С. 525-532.
5. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Пристеночная релаксация колебательного возбужденного газа // ЖЭТФ. 1978. Т. 75. С. 893-897.
6. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Об энергетическом спектре продуктов гетерогенной релаксации электрон-ионной рекомбинации // УФЖ. 1981. Т. 26. № 5. С. 841-844.
7. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Поляризационные колебания дипольных сред // Аннотации к докл. на конференции по "Теории плазмы". К., 19-23 октября 1971.
8. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Поляризационные колебания дипольных сред // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. В. 1. С. 219-227.

9. Коган Е.Я., Мальнев В.Н. Гетерогенная релаксация колебательно-возбужденных молекул газа // УФЖ. 1983. Т. 28. № 3. С. 374-381
10. Malnev V.N. Waves in the vibrational nonequilibrium media // Preprint ГТР-92-21Е. К., 1992.
11. Мальнев В.Н., Цвилий В.П. Коллективные движения в бесстолкновительной дипольной плазме // УФЖ. 1984. № 5. С. 699-704.
12. Петров С.В., Мальнев В.Н. О возможности использования звуковых волн для управления плазмой // В сб. "Высоко-температурные технологии с горением". Изд-во ИПЭ НАН Украины. К. 1995. С. 145-155.
13. Ivchenko V.M., Malnev V.N., and Martysh Eu.V. Influence of the Earth electrostatic field on sodium atoms emission from the D-ionosphere // Report on the 23rd European Physical Society Conference "Controlled Fusion and Plasma Physics". Kiev. 24-28 June 1996.
14. Chaika G.Eu. and Malnev V.N. Formation of a new phase nucleus in an excited dipole plasma // Report on the 23rd European Physical Society Conference "Controlled Fusion and Plasma Physics". Kiev. 24-28 June 1996.
15. Мальнев В.Н. и др. Горячие экситоны в области неоднородного электрического поля // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 379-382.
16. Ivchenko V.M., Malnev V.N., Martysh Eu.V. About one Mechanism of Seismogenic Generation of Some Metal Spectral Lines // Abstracts of the XXVth General Assemly Intern. Union of Radio Science. France-Lille, 1996. August 28-September 5. P. 72.
17. Solomon Mulugeta and Malnev V.N. Thermodynamic properties and waves in a dipole plasma // J. Plasma Phys. 1988. V. 39. Part 3. P. 475-483.
18. Bantikassegn W. and Malnev V., Waves in a paramagnetic plasma // J. Plasma Phys. , 1991. V. 45. Part 1. P. 125-134.
19. Chhajlany S.C., Malnev V.N. , and Kumar N. The Coulomb-diamagnetic problem in two dimensions // Preprint IC /88/ 120. Trieste. 1988.
20. Chhajlany S.C., Malnev V.N., and Kumar N. Coulomb-diamagnetic problem in two dimensions // Phys.Rev. A. 1989. V. 39. № 10. P. 5082-5084.
21. Chhajlany S.C. and Malnev V.N. Addendum to "Coulomb-diamagnetic problem in two dimensions " // Phys. Rev. A. 1991. V. 44. № 1. P. 3358-3360.
22. Chhajlany S.C., Malnev V.N. Polynomial solutions of the planar Coulomb diamagnetic problem // Phys. Rev. A. 1991. V. 43. P. 582-584.

23. Chhajlany S.C. and Malnev V.N. Dimensional study of some singular potentials // Phys.Rev.A. 1989. V. 40. № 5. P. 2778-2782.
24. Chhajlany S.C., Malnev V.N. Bound states of anharmonic potentials // Phys. Rev. A. 1990. V. 42. (BR). P. 3111-3114.
25. Chhajlany S.C. and Malnev V.N. The energy levels of the sextic double-well potential // J. Phys. A.: Math. Gen. 1990. V. 23. P. 3711-3713.
26. Chhajlany S.C. , Letov D.A., and Malnev V.N. Energy spectrum of the potential $V = ax^2 + x^4$ // J. Phys. A.: Math. Gen. 1991. V.24. P.2731-2741..
27. Железняк В.Н., Макаров Л.Н., Мальнев В.Н., Пирогов В.В. Моделирование методом магнитной аэрогидродинамической аналогии трехмерного обтекания летательных аппаратов с учетом работы силовых установок // Ученые Записки ЦАГИ. 1985. Т. 16. № 5. С. 97-101.
28. А.с. № 1088025 (СССР). Устройство для моделирования обтекания транспортных средств с реактивными двигателями /Козырев В.А., Макаров Л.Н., Мальнев В.Н. и Пирогов В.В. Оpubл. в БИ № 15. 1984.
29. Malnev V.N., Martysh Eu.V. The anomalous resistance of a dusty plasma // Abst. booklet of International Conf. on Plasma Physics. FOZ DO I GUACU-PR-Brasill, October 31 - November 4. 1994. P. 272.
30. Martysh Eu.V., Ivchenko V.M., Malnev V.M. Influence of the Earth electrostatic field on Sodium atoms emission from the D-ionosphere plasma // Abstracts 1996 International Conference on Plasma Physics . Nagoya. Japan. 9-13 September 1996. P. 72.

АННОТАЦИЯ

Мальнев В.Н. "Коллективные и релаксационные процессы в высоковозбужденных газах и плазме с учетом структуры молекул".

Диссертация представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Национальный университет им.Т.Г.Шевченко, Киев, Украина, 1996.

В диссертации представлены результаты теоретических исследований волн в колебательно-неравновесных газах симметричных нейтральных молекул, процессы гетерогенной релаксации колебательно-возбужденных молекул и гетерогенной электрон-ионной релаксации, коллективные свойства дипольной и парамагнитной плазмы, содержащей в качестве нейтральной компоненты молекулы с электрическими и магнитными моментами. Предлагается новый приближенный метод решения уравнения Шредингера для комбинированных потенциалов, некоторого класса ангармонических осцилляторов и потенциальных ям с двумя минимумами. Диссертация базируется на 30 научных публикациях.

Ключевые слова: колебательно-неравновесная среда, $V-T$ релаксация, объемная вязкость, неустойчивость, гетерогенная электрон-ионная рекомбинация, дипольная плазма, парамагнитная плазма, проблема кулоновского диамагнетизма, уравнение Шредингера, двойные потенциальные ямы.

SUMMARY

Malnev V.N. Collective and relaxation processes in highly excited gases and plasmas with account of the molecular structure .

The thesis is submitted for a degree of doctor of physical and mathematical sciences (field 01.04.02 - theoretical physics).

Taras Schevchenko National University , Kyiv, Ukraine, 1996.

It contains the results of theoretical research on the waves in vibration nonequilibrium gases, the processes of surface relaxation of vibration excited molecules, the collective properties of dipole and paramagnetic plasmas which contain as a neutral component molecules with electric and magnetic dipoles. A new approach to solving of the Schrodinger equation for combined potentials, some class of anharmonic oscillators and double potential wells is proposed. The thesis topics are based on 30 papers.

Key words: vibration nonequilibrium media, $V-T$ relaxation, bulk viscosity, instability, surface electron-ion recombination, dipole plasma, paramagnetic plasma, Coulomb diamagnetic problem, Schrodinger equation, double-well potentials.

АВ 36.248

Підписано до друку 11.11.96 . Формат 60x84/16
Ум. друк. арк. 1,08. Обл. вид. арк. 1,16
Тираж 100. Зам. 558. 1996 р.
Вид-во «АДФ-Україна»