Дніпропетровський національний університет

УДК 530.1

Ступка Антон Анатолійович

Кінетична теорія електромагнітних процесів в середовищі

01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дніпропетровськ – 2007

Дисертацією є рукопис.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі квантової макрофізики Дніпропетровського національного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Соколовський Олександр Йосипович, Дніпропетровський національний університет, професор кафедри квантової макрофізики, м. Дніпропетровськ.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, професор
Петров Ельмар Григорович, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, завідувач відділу квантової теорії молекул та кристалів, м. Київ,

доктор фізико-математичних наук, професор
Слюсаренко Юрій Вікторович, Інститут теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера Національного НЦ „Харківський фізико-технічний інститут", начальник відділу статистичної фізики і квантової теорії поля, м. Харків.

Провідна установа: Інститут фізики конденсованих систем НАН України, м. Львів.

Захист дисертації відбудеться "27" 06 2007 р. о 14 год. 15 хв. **на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.051.02 в Дніпропетровському національному університеті (49050, м. Дніпропетровськ, вул. Наукова 10, корп. 11, ауд. 300).**

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці Дніпропетровського національного університету.

Автореферат розісланий "18" травня 2007 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 08.051.02,
професор **Спиридонова І.М.**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Найбільш повно на теперішній час розвинута кінетична теорія газів та плазми, що в значній мірі ґрунтується на кінетичних рівняннях Больцмана та Власова-Ландау. Натомість розгляд електромагнітних (ЕМ) процесів у середовищі звичайно провадиться лише за допомогою рівнянь Максвела для середніх електричного та магнітного полів $E_a(x,t)$, $B_a(x,t)$. Опис поля окрім цих параметрів ще й нормальними та аномальними функціями розподілу фотонів, або бінарними кореляційними функціями електричного та магнітного полів та дослідження цих нових ступенів свободи є природнім узагальненням ЕМ теорії. У дисертації ЕМ поле вивчається як динамічна підсистема, що рівноправна із підсистемою заряджених частинок. Через макроскопічну кількість та принципову невизначеність мікроскопічних початкових умов руху зарядів з одного боку та власне ЕМ поля – з іншого, слід використовувати статистичну механіку, розглядаючи ЕМ поле як випадкову величину. Згідно з теорією ймовірності це означає потребу запровадити не тільки середнє поле, але і його кореляційні моменти (кореляційні функції) для більш повної характеристики поля. Дослідження динаміки кореляцій ЕМ поля почалося у статистичній радіофізиці (С.М. Ритов) на основі феноменологічних ланжевенівських методів. Вагомий внесок у вивчення динаміки кореляцій поля зроблено у квазілінійній теорії плазми, яку створено А.А. Ведєновим, Є.П. Веліховим та Р.З. Сагдєєвим. Однак цей підхід будувався на феноменологічному припущенні про випадковість фаз поля та недостатньо вивчалися самі ступені свободи, які описуються кореляціями ЕМ поля. Фундаментальний підхід до опису статистичних властивостей ЕМ поля в середовищі розробив Ю.Л. Климонтович, виходячи з ланцюжка часових рівнянь для функцій розподілу зарядів та поперечного поля, отриманого з мікроскопічної динаміки. Але ним для обриву цього ланцюжка використовувалися лише якісно обґрунтовані процедури, що придатні тільки для обмеженого кола задач. На важливість розгляду повздовжнього поля для опису плазмонних збуджень у плазмі вперше звернули увагу Д. Бом та Д. Пайнс. Вагомий внесок в обґрунтування кінетики ЕМ поля у плазмі зробив О.Г. Ситенко, який використовував у теорії методи нелінійної механіки. У той же час і в його роботах рівняння для кореляцій виводилися феноменологічним стохастичним методом, а динаміка системи вивчалась на основі рівняння Власова. Роботи останніх років, зокрема харківської школи теоретичної фізики, показали універсальність підходу М.М. Боголюбова до дослідження нерівноважних процесів – метода скороченого опису (МСО). О.І. Ахієзер та С.В. Пелетмінський розглянули випадок однорідного поля, яке описувалося однофотонною матрицею густини. У роботах С.В. Пелетмінського, В.І. Приходька та В.С. Щолокова при вивченні кінетики поперечного поля у гідродинамічному середовищі не було отримано рівнянь для бінарних кореляцій поля, але зазначена необхідність їх врахування. Таким чином, у дисертації досліджується актуальна проблема, розробка якої покращить розуміння перебігу електромагнітних процесів у середовищі, дасть приклад послідовного вивчення флуктуаційних (кореляційних) явищ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження статистичних властивостей ЕМ поля у суцільному середовищі з урахуванням просторових кореляцій поля на основі мікроскопічної динаміки системи і послідовного опису її просторово-неоднорідних станів. Сюди входить виведення часових рівнянь для середнього поля і його кореляцій на основі МСО, а також дослідження ефектів, пов'язаних з новими кореляційними ступенями свободи. Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати такі задачі:

1. Побудувати, виходячи з мікроскопічного розгляду та застосовуючи МСО, часові рівняння для кореляцій ЕМ поля у рівноважному середовищі із заряджених частинок. Дослідити їхні розв'язки та вивчити хвильові рухи.
2. Побудувати, виходячи з мікроскопічного розгляду та застосовуючи МСО, часові рівняння для кореляцій ЕМ поля у середовищі із заряджених частинок, яке знаходиться на гідродинамічному етапі еволюції. Дослідити їхні розв'язки та вивчити хвильові рухи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі квантової макрофізики Дніпропетровського національного університету в межах тем № 09-209-01 "Дослідження сигналів нової фізики і процесів у екстремальних зовнішніх умовах в розширених моделях елементарних частинок" (Міністерство освіти і науки України), № 01-072-04 "Дослідження фундаментальних процесів у екстремальних зовнішніх умовах методами квантової теорії поля" (Міністерство освіти і науки України).

Об'єкт та предмет досліджень. Об'єктом дисертаційного дослідження є фізична система з ЕМ поля та середовища із нерелятивістських заряджених частинок.

Предметом досліджень є середні поля та кореляції ЕМ поля як нові незалежні параметри скороченого опису системи та рухи, що описуються такими параметрами у рівноважному та гідродинамічному середовищах.

Методи досліджень. За основу дослідження системи ЕМ поля та багатьох заряджених частинок обрано методи статистичної фізики. Провідну роль у роботі відіграє МСО нерівноважних процесів Боголюбова. Опис станів системи, яка вивчається, грунтується на нерелятивістській квантовій електродинаміці. Також використовуються різні методи розв'язання систем рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації одержано такі нові наукові результати:

1. Дістало подальший розвиток МСО М.М. Боголюбова, в якому використано більш загальний статистичний оператор основного наближення для випадку малої взаємодії в системі. Показана зручність розгляду системи за часів, коли перехідні процеси до скороченого опису скінчилися і є можливість уникнути використання ефективних початкових умов. Розроблено нову нерелятивістську теорію збурень за ЕМ взаємодією, що забезпечує калібрувальну інваріантність отриманих рівнянь.

2. Уперше шляхом урахування динаміки ЕМ поля та можливостей МСО нерівноважних процесів одержано нові порівняно зі стохастичною теорією внески у системи рівнянь для просторових кореляцій ЕМ поля та для їх твірного функціонала у рівноважному середовищі із заряджених частинок. Отримано хвильовий розв'язок таких систем рівнянь. На випадок неоднорідних станів та відмінного від нуля середнього поля узагальнено опис ЕМ поля вігнерівською функцією розподілу фотонів.
3. Мікроскопічно та статистично обгрунтовано зв'язані системи рівнянь гідродинаміки заряджених частинок та рівнянь для середнього ЕМ поля та його бінарних просторових кореляцій, що узагальнює рівняння фізики плазми, радіаційної гідродинаміки та теорії переносу випромінювання. Уперше знайдено їхні розв'язки в однорідних та ізотропних станах системи та у граничному випадку малого радіуса кореляцій поля, зокрема аналогічні акустооптичному ефекту.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані у дисертації системи рівнянь можуть бути використані при розгляді електромагнітних явищ у рівноважних чи гідродинамічних середовищах. Зокрема, можливі застосування для обгрунтування феноменологічної теорії переносу випромінювання. При обчисленні будь-яких квадратичних по полю функцій, як то енергії, імпульса, тощо, слід використовувати другі кореляційні моменти і рівняння, що побудовано в дисертації. Результати та розроблені підходи дисертаційного дослідження можна використовувати при викладанні статистичної механіки, електродинаміки плазми, радіофізики, астрофізики у вищих навчальних закладах.

Особистий внесок здобувача. Основні результати та висновки отримано особисто здобувачем. Постановка задач, визначення напрямків досліджень та обговорення одержаних результатів проводилися разом із науковим керівником доктором фізико-математичних наук професором О.Й. Соколовським. Зокрема, здобувачем запроваджено використання більш загального статистичного оператора основного наближення для випадку малої взаємодії в системі [2-4,6]. Запропоновано розгляд системи за часів, коли перехідні процеси до скороченого опису скінчилися і є можливість уникнути використання ефективних початкових умов [2-4,6]. Здобувачем розроблено нові нерелятивістські теорії збурень за ЕМ взаємодією, що забезпечують калібрувальну інваріантність отриманих рівнянь [2,3]. Проведено аналітичні розрахунки та одержано нові порівняно зі стохастичною теорією внески у системи рівнянь для просторових кореляцій ЕМ поля [8,9,11] та для їх твірного функціонала у рівноважному середовищі із заряджених частинок [2]. Здобувачем отримано хвильові розв'язки таких систем рівнянь [3,8,12,13]. Виконано обчислення при узагальненні опису ЕМ поля вігнерівською функцією розподілу фотонів [5]. Отримано зв'язані системи рівнянь гідродинаміки заряджених частинок та рівнянь для середнього ЕМ поля та його бінарних просторових кореляцій [9-11]. Знайдено їх розв'язки в однорідних та ізотропних станах системи [6] та у граничному випадку малого радіуса кореляцій поля [13].

Апробація результатів дисертації. За матеріалами дисертації було здійснено доповіді на таких конференціях: І всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос" (м. Дніпропетровськ, 19-21 травня 1999 р.), ІІ всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція з міжнародною участю "Людина і космос" (м. Дніпропетровськ, 12-14 квітня 2000). ІІІ міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос" (м. Дніпропетровськ, 18-20 квітня 2001), International Conference "Quantum Electrodynamics and Statistical Physics" (Kharkiv, Ukraine, 30 October - 3 November 2001), V міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос" (м. Дніпропетровськ, 16-18 квітня 2003). INTAS Working party (Brussels, Belgium, 23-24 June 2003), VI міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос" (м. Дніпропетровськ, 14-16 квітня 2004), International Conference "Recent Trends in Kinetic Theory and its Applications" (Kyiv, Ukraine, 11-15 May, 2004), International Bogolyubov Kiev Conference "Modern Problems of Mathematical and Theoretical Physics" (Kyiv, 13-16 September 2004), The 10th International Conference "Mathematical Methods in Electromagnetic Theory" (Dnipropetrovsk, Ukraine, 14-17 September 2004), VII міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина і космос". (м. Дніпропетровськ, 13-15 квітня 2005), The 3rd International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" (Kyiv, Ukraine, 27-31 May 2005), International Conference "Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications" (Lviv, August 28-30 2005), The 13th International Congress on Plasma Physics (Kyiv, 22-26 May 2006), International Workshop "Nonlinear Physics and Mathematics" (Kyiv, 25-27 May, 2006), Робоча нарада-семінар "VI всеукраїнський конкурс молодих вчених у галузі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини" (м. Львів, 30-31 травня 2006), The 11th International Conference "Mathematical Methods in Electromagnetic Theory" (Kharkiv, 26-29 June, 2006), International Conference "Statistical Physics 2006. Condensed Matter: Theory and Applications" (Kharkiv, 11-15 September 2006), 2-nd International Conference on Quantum Electrodynamics and Statistical Physics QEDSP2006, (Kharkiv, September 19-23),
Підсумкові наукові конференції ДНУ (м. Дніпропетровськ, 2004-2006) семінари кафедри квантової макрофізики ДНУ (м. Дніпропетровськ, 1999-2006).

Публікації. Результати дослідження опубліковано у 10 статтях: 9 – у фахових журналах [1-9], 1 – у математичному журналі [10], а також 3 статті – у працях конференцій [11-13], 23 тези доповідей [14-36].

Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (166 одиниць, 18 стор.) і додатків (3 одиниці, 57 стор.). Повний обсяг дисертації становить 241 стор., з них обсяг основної частини дисертації складає 166 стор.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраного напрямку досліджень, зв'язок роботи з науковими напрямами і темами, сформульовано мету і задачі роботи, її наукову новизну та практичну значимість, а також наведено дані про апробацію результатів та публікації за темою дисертації.

Перший розділ присвячено огляду наукових досліджень у галузі електродинаміки суцільних середовищ, які мають відношення до дисертаційної роботи, та викладенню МСО нерівноважних процесів. У підсумку показано, що врахування кореляцій ЕМ поля проводиться й досі недостатньо і немає спільного підходу в різних галузях ЕМ теорії. МСО подано у вигляді, який безпосередньо можна застосувати для більш детального дослідження спільних рухів заряджених частинок та ЕМ поля.

Підрозділ 1.1 висвітлює різні наявні підходи до опису ЕМ поля. Підкреслено, що існує необхідність урахування кореляцій ЕМ поля поряд з нелінійними доданками. Без цього не обійтись при розгляді нелінійних процесів (наприклад, розсіяння світла), при обговоренні законів збереження енергії та імпульса ЕМ поля, які формулюються в термінах бінарних кореляцій поля. Урахування з метою опису кореляцій ЕМ поля ланжевенівських методів у теорії із самоузгодженим полем типу Власова та у флуктуаційній електродинаміці типу Ландау (Ритов, Ситенко) не враховує достатньо повно динаміку поля.

Підрозділ 1.2. дає стандартне формулювання МСО Боголюбова, що розроблено у працях харківської школи теоретичної фізики (Ахієзер, Пелетмінський). Нерівноважні стани системи повністю описуються її статистичним оператором (СО) $\rho(t)$, який задовольняє квантове рівняння Ліувілля

$$\partial_t \rho(t) = -\frac{i}{\hbar}\left[\hat{H}, \rho(t)\right] \equiv \mathbf{L}\rho(t) \qquad (1)$$

($\hat{H}$ - оператор Гамільтона, $\mathbf{L}$ - оператор Ліувілля). Згідно з ідеєю Боголюбова при наявності в системі декількох характерних часів її еволюція проходить через відповідні етапи. На цих етапах для опису системи можна застосовувати відносно вузький набір параметрів скороченого опису (НСО) $\eta_a(t)$, які повністю характеризують систему. СО системи при цьому залежить від часу тільки через їх посередність

$$\rho(t) \equiv e^{t\mathbf{L}}\rho_0 \cdot \xrightarrow[t>>\tau_0]{} \rho(\eta(t,\rho_0)) \qquad (\eta_a(t,\rho_0) \equiv \mathrm{Sp}\,\rho(\eta(t,\rho_0))\hat{\eta}_a), \qquad (2)$$

що становить зміст функціональної гіпотези Боголюбова (τ_0 є тривалістю перехідних процесів і називається часом синхронізації). Важливу роль у теорії відіграє ергодичне співвідношення, яке є функціональною гіпотезою, записаною в основному наближенні за малими параметрами теорії. У випадку малої взаємодії в системі воно записується у вигляді

$$e^{rL_0}\rho_0 \xrightarrow[r>>r_0]{} e^{rL_0}\rho^{(0)}(\eta^{(0)}(0,\rho_0)) \qquad (3)$$

і слугує граничною умовою до рівняння Ліувілля (1), що дозволяє стандартним чином будувати інтегральні рівняння для СО $\rho(\eta)$. Наведено розв'язки інтегральних рівнянь у теорії збурень за взаємодією, малими градієнтами та комбінацією цих малих величин.

Другий розділ присвячено кінетиці ЕМ поля у рівноважному середовищі із заряджених частинок. Його основним результатом є отримання рівнянь руху для ЕМ поля при використанні як НСО середнього поля та його кореляцій. Вказану теорію можна називати також флуктуаційною електродинамікою (ФЕД або $ФЕД_2$ у випадку врахування тільки бінарних кореляцій поля) в рівноважному середовищі. Рівняння цієї теорії дають відомі результати: теорії перенесення випромінювання - при слабкій неоднорідності поля, та теорії Власова із самоузгодженим полем - після додаткового розвинення за взаємодією. Передбачено нові рухи для кореляційних функцій поля. У нерелятивістському випадку отримано часове рівняння для твірного функціонала ЕМ поля. Показано, що значення рівноважних кореляцій ЕМ поля не змінюються після врахування нерелятивістської взаємодії.

Підрозділ 2.1. При використанні МСО зазначено, що для вивчення підсистеми, оператори НСО $\hat{\eta}_a$ якої задовольняють умові Пелетмінського-Яценка, зручно розглядати скорочення опису з початку спостережень, що дозволяє використовувати дійсні початкові умови замість ефективних. У калібруванні Кулона з точністю до першого порядку за взаємодією отримано статистичний оператор системи

$$\rho(\eta) = \rho_q(\eta)w + \frac{i}{c\hbar}\int_0^\infty d\tau \int dx\Big[\hat{A}_n(x,\tau)\hat{j}_n(x,\tau).\rho_q(\eta)w\Big], \qquad (4)$$

де $\hat{A}_n(x,t)$, $\hat{j}_n(x,t)$ – векторний потенціал поперечного ЕМ поля та струм у представленні взаємодії

$$\hat{A}_n(x,t) \equiv e^{tL_0}\hat{A}_n(x) = \int dx' u_{nl}(x-x',t)\hat{B}_l(x') + \int dx' v(x-x',t)\hat{E}_n(x'), \qquad \hat{j}_n(x,t) = e^{tL_0}\hat{j}_n(x);$$

$$u_{nl}(x) \equiv i\int \frac{dk}{(2\pi)^3}\frac{\cos\omega_k t}{k}\tilde{k}_m\varepsilon_{nml}e^{ikx}, \qquad v(x,t) \equiv -\int \frac{dk}{(2\pi)^3}\frac{\sin\omega_k t}{k}e^{ikx} \qquad (5)$$

($\rho_q(\eta)$ – квазірівноважний СО вільного ЕМ поля; $\tilde{k}_n \equiv k_n/k$). Отримано лінійну систему рівнянь для середнього поля $E_n(x,t)$, $B_n(x,t)$

$$\partial_t\vec{E} = c\,rot\vec{B} - 4\pi\vec{j}^t, \quad \partial_t\vec{B} = -c\,rot\vec{E}, \quad div\vec{E} = 0, \quad div\vec{B} = 0; \quad J_n^t(x,t) = Sp\rho(\eta(t))\hat{J}_n^t(x) \qquad (6)$$

($\hat{J}_n(x)$ – подовжений струм) та його бінарних кореляцій

$$\partial_t(E_n^x E_l^{x'})_t = c\,rot_n(\vec{B}^x E_l^{x'})_t + c\,rot_l'(E_n^x\vec{B}^{x'})_t - 4\pi\left\{(J_n^{t,x}E_l^{x'})_t + (E_n^x J_l^{t,x'})_t\right\},$$

$$\partial_t(E_n^x B_l^{x'})_t = c\,rot_n(\vec{B}^x B_l^{x'})_t - c\,rot_l'(E_n^x\vec{E}^{x'})_t - 4\pi(J_n^{t,x}B_l^{x'})_t,$$

$$\partial_t(B_n^x E_l^{x'})_t = -c\,rot_n(\vec{E}^x E_l^{x'})' + c\,rot_l'(B_n^x\vec{B}^{x'})_t - 4\pi(B_n^x J_l^{t,x'})_t,$$

$$\partial_t(B_n^x B_l^{x'})_t = -c\,rot_n(\vec{E}^x E_l^{x'})_t - c\,rot_l'(E_n^x\vec{E}^{x'})_t \qquad (7)$$

($(E_n^t E_l^{x'})_t \equiv \mathrm{Sp}\,\rho(t)\{\hat{E}_n(x),\hat{E}_l(x')\} - 2E_n(x,t)E_l(x',t)$ і т.д.). (6) та (7) є рівняннями флуктуаційної електродинаміки – $ФЕД_2$. Матеріальні рівняння для середнього поперечного струму $J_n^t(x,t)$ та кореляцій струм-поле зведено до вигляду

$$J_n^t(x,t) = \int dx' M(x-x')E_n(x',t) + \int dx' N_{nl}^{\cdot}(x-x')B_l(x',t); \qquad (8)$$

$$(B_n^x J_l^{t,x'})_t = \int dx''\{M(x'-x'')(B_n^x E_l^{x'})_t + N_{lm}(x'-x'')(B_n^x B_m^{x''})_t\} + S_{nl}(x-x'),$$

$$(J_n^{t,x}B_l^{x'})_t = \int dx''\{M(x-x'')(E_n^{x''}B_l^{x'})_t + N_{lm}(x-x'')(B_m^{x''}B_l^{x'})_t\} + S_{nl}(x-x'),$$

$$(E_n^x J_l^{t,x'})_t = \int dx''\{M(x'-x'')(E_n^x E_l^{x'})_t + N_{lm}(x'-x'')(E_n^x B_m^{x''})_t\} + T_{nl}(x-x'),$$

$$(J_n^{t,x}E_l^{x'})_t = \int dx''\{M(x-x'')(E_n^{x''}E_l^{x'})_t + N_{lm}(x-x'')(B_m^{x''}E_l^{x'})_t\} + T_{nl}(x-x'), \qquad (9)$$

що узгоджується з принципом Онзагера. Знайдено мікроскопічні вирази для кінетичних косфіцієнтів та вільних членів $T_{nl}(x)$, $S_{nl}(x)$ з урахуванням просторової дисперсії

$$M_k = \frac{\mathrm{Im}\,G(k,\omega_k)}{\omega_k}, \qquad N_{nl,k} = i\varepsilon_{nml}\tilde{k}_m\frac{\mathrm{Re}\,G(k,\omega_k)-\chi}{\omega_k} = i\varepsilon_{nml}k_m N_k; \qquad (10)$$

$$S_{nl,k} = -8\pi T N_{nl,k}, \qquad T_{nl,k} = -8\pi T\delta_{nl}^t M_k, \qquad (11)$$

($G(k,\omega)$ – поперечна складова функції Гріна струмів; у стохастичному підході величини $T_{nl}(x)$, $S_{nl}(x)$ запроваджуються як кореляції сил Ланжевена; $\delta_{nl}^t \equiv \delta_{nl} - \tilde{k}_n\tilde{k}_l$). Величини M_k, N_k/c є провідністю та магнітною сприйнятливістю системи. Отримано дисперсійні співвідношення $\omega = \pm\omega'(k) - i\delta(k)$ для поперечних хвиль середнього ЕМ поля

$$\omega'(k) \equiv \sqrt{\omega_k^2 + \Omega^2 - 4\pi\,\mathrm{Re}\,G(k,\omega_k) - \left(\frac{2\pi}{\omega_k}\mathrm{Im}\,G(k,\omega_k)\right)^2}, \qquad \delta(k) \equiv -\frac{2\pi}{\omega_k}\mathrm{Im}\,G(k,\omega_k), \qquad (12)$$

які збігаються після додаткового розвинення за взаємодією з результатами інших авторів. Уперше знайдено дисперсійні співвідношення для "хвиль" бінарних кореляцій ЕМ поля

$$\left(E_n^t E_l^{t'}\right): \qquad \delta(k,k') = \delta(k) + \delta(k'), \qquad \omega(k,k') = \pm\omega'(k) \pm \omega'(k') \qquad (13)$$

Рівноважні значення кореляцій також збігаються з відомими, що свідчить про виконання принципу відповідності в розвинутій теорії.

Підрозділ 2.2. Для електромагнітного поля, що знаходиться у рівноважній плазмі, у калібруванні Кулона отримано систему з рівнянь Максвела для середнього поля $E_n(x,t)$, $B_n(x,t)$ (або

для середніх $\bar{c}_{k\alpha}(t) \equiv \mathrm{Sp}\,\rho(\eta(t))c_{k\alpha}$ від операторів знищення фотонів $c_{k\alpha}$) та кінетичного рівняння для одночастинкової матриці густини фотонів $n_{k\alpha,k'\alpha'}(t) \equiv \mathrm{Sp}\,\rho(\eta(t))c^{+}_{k\alpha}c_{k'\alpha'}$

$$\partial_t n_{k\alpha,k'\alpha'} = i\left(\tilde{\omega}_k - \tilde{\omega}_{k'}\right)n_{k\alpha,k'\alpha'} - 2\pi\left(M_k + M_{k'}\right)\left(n_{k\alpha,k'\alpha'} - n^{eq}_{k\alpha,k'\alpha'}\right) + i(a_k\bar{c}_{-k\alpha}\bar{c}_{k'\alpha'} - c.c.) \qquad (14)$$

Кінетичне рівняння (14) з точністю до другого порядку за взаємодією описує просторово неоднорідні стани системи фотонів при відмінному від нуля середньому полі. Знайдено частоти власних електромагнітних хвиль у системі $\omega^t(k)$, декремент їхнього згасання $\delta(k)$, а також перенормовані частоти фотонів $\tilde{\omega}_k$ та час релаксації фотонного газу

$$\tilde{\omega}_k = \omega_k - 2\pi c N_k, \qquad n^{eq}_{k\alpha,k'\alpha'} = \frac{\delta_{k,k'}\delta_{\alpha,\alpha'}}{e^{\frac{\hbar\omega_k}{T}} - 1}, \qquad \tau_{kk'} \equiv 1/2\pi\left(M_k + M_{k'}\right), \qquad a_k \equiv -2\pi(N_k + iM_k) \qquad (15)$$

При близьких але великих хвильових векторах, тобто слабкій неоднорідності та швидкозмінності ЕМ поля, дисперсійні співвідношення для хвиль кореляцій попереднього підрозділу збігаються з результатами цього. Отже, теорія перенесення випромінювання, яка ґрунтується на рівнянні (14) є окремим випадком рівнянь (7) для кореляційних моментів поля.

Підрозділ 2.3. Описано нерелятивістські ЕМ процеси з точністю до другого порядку за слабкою взаємодією поля із класичною рівноважною плазмою. Розгляд проведено у калібруванні Гамільтона. У якості ПСО, поряд із стандартними – середніми полями $E_n(x,t)$, $B_n(x,t)$, обрано бінарні кореляції ЕМ поля. Часові рівняння для зазначених ПСО отримано, як і у підрозділі 2.1, на основі МСО, але тепер в основному наближенні середовище є ідеальним газом (максвеллівською плазмою). Доведено ідентичність рівнянь Максвела, які отримано із використанням МСО, та результатів наближення самоузгодженого поля, що побудовано на основі рівняння Власова після розвинення за допомогою формули $E_n(t-\tau) = \mathrm{Sp}\,\rho(t-\tau)\hat{E}_n = \mathrm{Sp}\,\rho(t)e^{-\tau L}E_n = \mathrm{Sp}\,\rho(t)e^{-\tau L_0}\hat{E}_n$ часової дисперсії. У матеріальному рівнянні для струму, що входить у рівняння Максвелла, запроваджено нові порівняно з підрозділом 2.1 кінетичні коефіцієнти $\tilde{M}_{nl,k}$, $\tilde{N}_{nl,k}$, оскільки тепер середній струм має і повздовжню складову

$$J_n(k,\omega) = \tilde{M}_{nl,k}E_l(k,\omega) + \tilde{N}_{nl,k}B_l(k,\omega). \qquad (16)$$

Матеріальні рівняння для кореляційних функцій струм-поле мають аналогічний (9) вигляд із заміною $M(x)$ на $\tilde{M}_{nl}(x)$. У наближенні максвеллівської плазми продемонстровано, що рівняння для кореляційних моментів відповідають гіпотезі Онзагера. Для цього випадку отримано відомі частоти поперечних хвиль ЕМ поля $\omega^t(k) = \sqrt{c^2k^2 + \Omega^2}$, які для максвелівської плазми не згасають. Також показано, що для малих довжин - менше дебаєвського радіуса - повздовжні хвилі не існують $\omega^t(k) = 0$, що пояснюється ефектом черенковського поглинання. Отримано рівноважний розв'язок

для бінарних кореляцій поля, який відповідає значенням з флуктуаційно-дисипаційної теореми. Розглянуто також хвилі бінарних кореляцій аналогічно тому, як це зроблено у підрозділі 2.1. Додатково проаналізовано випадок ізотропного та однорідного ЕМ поля, в якому середнє поле нульове. В цьому випадку в системі звичайні ЕМ хвилі відсутні, але можливі поперечні хвилі бінарних кореляцій з частотою $2\omega^t(k)$. Слід зауважити, що загальна частина цього підрозділу може бути застосована не тільки у випадку максвеллівської плазми. До того ж, у якості розширення розгляду підрозділу 2.1, у ній враховується динаміка повздовжнього поля.

Підрозділ 2.4. Використання калібрування Гамільтона в кінетиці ЕМ поля дає перевагу, пов'язану з розумінням векторного потенціалу поля як його узагальненої координати. У цьому підході в термінах середнього поля як ПСО розглянуто кінетику поля в квантовому рівноважному середовищі. Знайдені загальні вирази для законів дисперсії поперечних та повздовжніх ЕМ хвиль. У випадку поперечних хвиль результати збігаються з отриманими у підрозділі 2.1. Показано, що метод скороченого опису Боголюбова можна використовувати не тільки для виведення рівнянь для ПСО, а і з метою обчислення ефективного оператора Гамільтона її підсистеми. Встановлено, що ефективний оператор Гамільтона ЕМ поля в рівноважному середовищі $\hat{H}_{\mathrm{ef}} = \sum_{k,\alpha}\hbar\omega_\alpha(k)(c^{+}_{k\alpha}c_{k\alpha} + 1/2)$ описує кванти хвиль середнього поля. Розглядати ЕМ в середовищі в термінах квазічастинок має зміст тільки за умов малого згасання відповідних хвиль.

Підрозділ 2.5. У калібруванні Гамільтона побудовано рівняння ФЕД класичного ЕМ поля в рівноважному середовищі як теорії, що описує його нерівноважні стани середнім полем $\xi_\mu(t) \equiv \xi_m(x,t): E_n(x,t), B_n(x,t)$ і всіма його кореляціями $g_{\mu_1\ldots\mu_s}(t)$ (або моментами $\eta_{\mu_1\ldots\mu_s}(t)$). Для цього розроблено класичну теорію збурень при розв'язанні інтегрального рівняння для СО системи. Рівняння ФЕД, які записано у термінах твірного функціонала моментів поля $F(\eta,u) = 1 + \sum_{s=1}^{\infty}\frac{1}{s!}\sum_{\mu_1\ldots\mu_s}u_{\mu_1}\ldots u_{\mu_s}\eta_{\mu_1\ldots\mu_s}$ ($\eta_\mu \equiv \xi_\mu$), мають вигляд

$$\partial_t F(\eta(t),u) = F(\eta(t), u + \frac{\partial}{\partial\xi})\sum_\mu u_\mu L_\mu(u,\xi)|_{\xi\to 0}, \qquad L_\mu(u,\xi) = i\sum_\mu c_{\mu\mu'}\xi_{\mu'} - 4\pi I_\mu(\xi + 4\pi Tu). \qquad (17)$$

де $L_\mu(u=0,\xi)$ – права частина рівнянь для середнього поля у відсутності кореляцій. Тут $I_\mu(\xi)$ середній струм, який обчислено з точністю до внесків четвертого порядку за ЕМ взаємодією включно, що дає матеріальне рівняння теорії. Установлено, що залежність електричного струму від кореляцій поля дається формулою $I_\mu(\xi,g) = e^{G(g,\frac{\partial}{\partial\xi})}I_\mu(\xi)$, де $G(g,u)$ – твірний функціонал кореляцій. Функція $I_\mu(\xi,g)$ є нелінійною, локальною за часом, але нелокальною в просторі, тобто враховує просторову дисперсію матеріальних коефіцієнтів теорії. Обговорено відношення розробленої теорії до опису ЕМ поля середнім полем і його бінарними кореляціями, тобто до ФЕД,

Установлено, що рівноважне поле є гауссівським, тобто всі його просторові кореляції окрім бінарної $(\xi_\mu \xi_{\mu'})$ дорівнюють нулю, причому $(\xi_\mu \xi_{\mu'}) = 4\pi T \delta_{\mu\mu'}$.

Розглянуто стандартний підхід до розв'язування побудованих рівнянь, у якому нелінійні внески до струму $I_\mu(\xi)$ вважаються малими у відповідності до свого порядку за ЕМ взаємодією. Струм $I_\mu(\xi)$ знайдено с точністю до кубічних за полем внесків, що дозволяє на основі одержаних рівнянь ФЕД розглядати задачі нелінійної оптики. При цьому багаточочкова кореляційна функція після Фур'є-перетворень має дисперсію $\omega(k_1,..,k_n) = \sum_{i=1}^{n} \omega(k_i)$, що ідентично відповідному добутку ЕМ хвиль середніх полів. Серед подальших застосувань рівнянь ФЕД розглянуто теорію релеєвського розсіяння ЕМ хвиль.

Третій розділ присвячено кінетиці ЕМ поля в гідродинамічному середовищі. Основним його результатом є побудова замкненої систем рівнянь з рівнянь гідродинаміки плазмового середовища та флуктуаційної електродинаміки з урахуванням бінарних кореляцій поля (ФЕД$_2$ у гідродинамічному середовищі). Передбачено нові гілки коливань у плазмі, що пов'язані з урахуванням кореляційних функцій ЕМ поля. Зокрема, розглянуто зв'язані завдяки взаємодії хвилі поперечних кореляцій поля та густин середовища і знайдено їхні закони дисперсії. Також, передбачено акустооптичний ефект для кореляцій поля, тобто вплив звукових хвиль на кореляції ЕМ поля. В однорідному випадку передбачено коливання енергій підсистем поля та плазми з подвоєною плазмовою частотою при нехтуванні зіткненнями.

Підрозділ 3.1. У калібруванні Гамільтона для випадку гідродинамічного середовища побудовано нову систему рівнянь електродинаміки суцільних середовищ, що враховує кореляції ЕМ поля як нові незалежні ПСО

$$\partial_t E_n = c\Delta_{nl} A_l - 4\pi J_n, \qquad \partial_t A_n = -cE_n; \tag{18}$$

$$\partial_t (E_n^x E_l^{x'})_t = c\Delta_{nm}(A_m^x E_l^{x'})_t + c\Delta'_{lm}(E_n^x A_m^{x'})_t - 4\pi\left\{(J_n^x E_l^{x'})_t + (E_n^x J_l^{x'})_t\right\},$$

$$\partial_t (E_n^x A_l^{x'})_t = c\Delta_{nm}(A_m^x A_l^{x'})_t - c(E_n^x E_l^{x'})_t - 4\pi (J_n^x A_l^{x'})_t, \qquad \partial_t (A_n^x A_l^{x'})_t = -c(E_n^x A_l^{x'})_t - c(A_n^x E_l^{x'})_t,$$

$$\partial_t (A_n^x E_l^{x'})_t = -c(E_n^x E_l^{x'})_t + c\Delta'_{lm}(A_n^x A_m^{x'})_t - 4\pi (A_n^x J_l^{x'})_t;$$

$$\partial_t \sigma_\alpha = -\frac{\partial i_{\alpha n}}{\partial x_n}, \qquad \partial_t \pi_n = -\frac{\partial \Pi_{nl}}{\partial x_l} + \left\{\rho E_n + \frac{1}{c}e_{nmr} J_m B_r\right\} + \frac{1}{2}\left\{(\rho E_n)_t + \frac{1}{c}e_{nmr}(J_m B_r)_t\right\}$$

$$\partial_t \varepsilon = -\frac{\partial q_n}{\partial x_n} + J_n E_n + \frac{1}{2}(J_n E_n)_t \tag{19}$$

($(J_n B_l) \equiv (J_n^x B_l^x)$ і т.д., $\Delta_{nl} \equiv \partial^2 / \partial x_n \partial x_l - \delta_{nl}\Delta$; $\sigma_\alpha, \pi_n, \varepsilon$ — густини маси компоненти, імпульсу, енергії середовища). До рівнянь (18), (19) (ФЕД$_2$ у гідродинамічному середовищі) отримано системи ма-

теріальних рівнянь, що узагальнюють (8), (9), а також нові матеріальні рівняння для внесків поля в гідродинамічні потоки.

У першому розділі вивчалися хвилі середнього ЕМ поля та хвилі його бінарних кореляцій у рівноважному середовищі. На основі системи рівнянь (18), (19) можна вивчати взаємодію зазначених хвиль із звуковими хвилями середовища. Це веде до корекції законів дисперсії всіх хвиль у тому числі внаслідок урахування кореляцій поля як нових ПСО. Отримана система рівнянь (18), (19) у випадку рівноважного середовища переходить у рівняння підрозділу 2.3, де середовище у вивченому наближенні є максвеллівською плазмою, та у рівняння підрозділу 2.1, де розглядалося лише поперечне ЕМ поле. Серед подальших застосувань рівнянь (19) можна виділити побудову рівнянь радіаційної гідродинаміки.

Підрозділ 3.2. У калібруванні Гамільтона вивчено однорідну та ізотропну систему з плазми та ЕМ поля, яке описується тільки своїми кореляціями. Передбачено ефект зв'язаних коливань поперечних кореляцій поля і температури квазірівноважного середовища з частотою, що для максвеллівської плазми приблизно дорівнює двом плазмовим $\omega \approx 2\Omega$. В основі дослідження цього питання лежить отримане в роботі часове рівняння для густини енергії середовища $\partial_t \varepsilon(t) = \frac{1}{2V}\int d^3x (J_n^x E_n^x)_t$. Описане явище є найочевиднішим кореляційним ефектом у даній системі. Варто зазначити, що подібний ефект можливий і в інших системах з бозонним полем. Окрім цього вивчено рух пробної частинки у такому електромагнітному полі з фіксованим хвильовим вектором. Виявлено ефект коливань квадрату швидкості такої частинки з частотою коливань кореляцій поля $(v^2)_t = \frac{(EA)^t \Omega^2}{2mc\omega^t(k)} \sin 2\omega^t(k)t$.

Підрозділ 3.3. Одержані в роботі рівняння (18), (19) ФЕД$_2$ у гідродинамічному середовищі застосовано до плазмі, яка є локально-рівноважним максвеллівським газом. Додатково для спрощення розглянуто динаміку кореляцій поля малого радіуса. Замкнута система рівнянь для компонент Фур'є відхилень від рівноваги густини маси, швидкості і температури плазми та кореляцій ЕМ поля зведена до вигляду

$$\partial_t \delta\sigma_k = -ik_n \sigma \delta u_{nk}, \quad \partial_t \delta T_k = -ik_n w \delta u_{nk} + \frac{i}{2}\frac{\Omega^2}{qc}\delta(E_n Z_n)_k,$$

$$\partial_t \delta u_{nk} = -ik_n(\alpha_\sigma \delta\sigma_k + \alpha_t \delta T_k) + i\frac{\Omega^2}{2c^2 r}\tilde{k}_n\{\delta(Z_l Z_l)_k - 8\pi\delta T_k\}; \tag{20}$$

$$\partial_t \delta(E_n Z_l)_k = -ick\delta(Z_n Z_l)_t - i\frac{\Omega^2}{ck}\{\delta(Z_n Z_l)_k - 4\pi\delta_{nl}\delta T_k\}, \quad \partial_t \delta(Z_n Z_l)_k = -ick\delta(E_n Z_l)_k \tag{21}$$

($Z_{nk} \equiv \varepsilon_{nmi}\tilde{k}_m B_{lk} = -ikA'_{nk}$, $\alpha_\sigma \equiv T/m\sigma$, $\alpha_\gamma \equiv 1/m$, $w \equiv 2T/3$; q, r – параметри, які враховують межі застосування теорії). На основі цих рівнянь вивчено взаємодію поперечних хвиль кореляцій поля (випадок ізотропних кореляцій) та звукових хвиль. Знайдено корекції до законів дисперсії цих хвиль за рахунок ЕМ взаємодії. Передбачено акустооптичний ефект для кореляцій поля, тобто вплив звукових хвиль на хвилі кореляцій. Зокрема, вивчено феномен акустичної модуляції коливань кореляцій $\omega = \sqrt{k_s^2 c^2 + \Omega^2} + k_s u$, який подібний акустичній модуляції світла звуковою хвилею. Передбачено новий ефект коливань кореляцій з гідродинамічними частотами $\omega = k_s u,\ 2k_s u$.

Підрозділ 3.4. У калібруванні Гамільтона отримано систему рівнянь ФЕД$_2$ для ЕМ поля у гідродинамічній плазмі з різними швидкостями та температурами компонент. Гідродинаміку побудовано у бездисипативному наближенні. На основі отриманих рівнянь можна вивчати вплив бінарних кореляцій ЕМ поля на процеси у багатокомпонентній плазмі. У випадку збігу швидкостей та температур усіх компонент плазми одержані рівняння переходять у рівняння підрозділу 3.1 без дисипації.

Підрозділ 3.5. У калібруванні Гамільтона отримано систему рівнянь ФЕД$_2$ у середовищі, тільки одна компонента якого є гідродинамічною, а інші - рівноважні. Знайдено вирази для частоти і декремента згасання повздовжніх хвиль середнього ЕМ поля та його кореляцій малого радіуса. Показано важливість послідовного врахування динаміки системи, що корегує закон дисперсії хвиль та декремент їх згасання

$$\omega^l(k) = \left\{\Omega - \xi^2/8\Omega + O(\lambda^3)\right\} + \left\{u^2/2\Omega - [8\theta(\psi(\theta + 8\pi\lambda_1) + \Delta) + \right.$$
$$\left. + 4(3\psi\theta + \Delta)\xi + 3u^2\xi^2]/16\Omega^3 + O(\lambda^3)\right\}k^2 + O(k^3) \qquad (22)$$

$$\delta^l(k) = \left\{\xi/2 + O(\lambda^3)\right\} + \left\{-(\psi\theta + \Lambda + u^2\xi)/2\Omega^2 + O(\lambda^3)\right\}k^2 + O(k^3) \qquad (23)$$

(тут u -- швидкість звуку; θ, ξ, Δ – визначені кінстичні коефіцієнти, λ – параметр малості ЕМ взаємодії).

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні вивчалося нерелятивістське середовище, що складається із заряджених та нейтральних частинок. Частота їхніх зіткнень може бути різною відносно часу спостережень, тому розглянуто випадки рівноважного середовища зі сталою або змінною у часі температурою, а також середовища, що перебуває на гідродинамічному етапі еволюції й описується густинами кількості частинок та масовою швидкістю і температурою (або цими величинами для окремих компонент). Частота ЕМ взаємодії, яку можна оцінити як ленгмюрівську, вважалася значно меншою характерних частот рухів у середовищі, що дозволяє часову дисперсію розкласти за

взаємодією, тому параметрами опису ЕМ поля обрано (поряд із середнім полем) його просторові кореляційні функції. Найбільш повну інформацію про систему містить її статистичний оператор, для знаходження якого треба розв'язати квантове рівняння Ліувілля. Це було зроблено за вищенаведених умов методом скороченого опису Боголюбова. При чому оператори параметрів скороченого опису поля задовольняють умову Пелетмінського-Яценка.

1. Уперше з використанням МСО Боголюбова побудовано замкнену систему лінійних рівнянь для середнього ЕМ поля та його бінарних кореляцій у рівноважному середовищі. Розглянуто як суто поперечне – у калібруванні Кулона, так і повне – у калібруванні Гамільтона, поле. Показано, що кінетичні коефіцієнти цих рівнянь відповідають звичайним визначенням. У матеріальні рівняння для бінарних кореляцій завдяки послідовному врахуванню динаміки полів увійшли вільні члени, що у стохастичних підходах відповідають внескам сил Ланжевена.
2. Знайдено розв'язок такої системи рівнянь, що відповідає новому рухові в системі – хвилям кореляцій ЕМ поля, що аналогічні звичайним хвилям середнього ЕМ поля. Такий рух існує і при нульовому середньому полі в середовищі.
3. Показано, що опис ЕМ поля нормальною функцією Вігнера фотонів (без урахування їхніх аномальних функцій розподілу) еквівалентний опису кореляцій всіма бінарними кореляційними функціями ЕМ поля лише у випадку слабкої просторової неоднорідності поля.
4. Запропоновано метод побудови ефективного оператора Гамільтона ЕМ поля у рівноважному середовищі, виходячи з рівняння Ліувілля та МСО. На основі цього гамільтоніана запроваджено фотони та плазмони та проілюстровано ідею корпускулярно-хвильового дуалізму.
5. Проведено порівняння отриманих результатів з висновками теорії, що ґрунтується на рівняннях Власова із самоузгодженим полем. Показано, що після повного розвинення за взаємодією результати теорії Власова для середнього поля повністю ідентичні результатам дисертації, проте кореляції ЕМ поля безпосередньо рівнянням Власова не враховуються.
6. Запропоновано нерелятивістську неквантову теорію збурень, з використанням якої знайдено функцію розподілу системи з поля та середовища з точністю до внесків третього порядку за слабкою ЕМ взаємодією включно. На цій основі побудовано часове рівняння для твірного функціоналу всіх кореляцій поля, що узагальнює рівняння нелінійної оптики на випадок урахування кореляцій поля.
7. При розгляді отриманого рівняння для твірного функціонала у будь-якому порядку нерелятивістської теорії збурень (тобто враховуючи в повній мірі взаємодію ЕМ поля із зарядами) вперше показано, що рівноважне ЕМ поле має гауссівський розподіл. Знайдено, що дисперсійна залежність рухів моментів ЕМ поля може бути ідентичною добуткові середніх значень поля, що означає виникнення частот, аналогічних частотам комбінаційного розсіяння.

8. Вивчено випадок однорідного та ізотропного поля, коли середнє поле відсутнє, а середовище квазірівноважне. Уперше показано виникнення зв'язаних коливань бінарних кореляцій поля та температури середовища, що відповідає перетіканню енергії між підсистемами.
9. З точністю до другого порядку за взаємодією побудовано замкнену систему з рівнянь гідродинаміки для середовища та рівнянь для середнього поля та його бінарних кореляцій. Розглянуто опис плазми або єдиною масовою швидкістю та температурою з урахуванням дисипацій, або масовою швидкістю та температурою кожної компоненти, а також, коли одна компонента на гідродинамічному етапі еволюції, а інші – в рівновазі. ЕМ поле розглядалося як суто поперечне – у калібруванні Кулона, так і повне – у калібруванні Гамільтона.
10. Показано можливість виникнення різних хвиль малої амплітуди параметрів скороченого опису ЕМ поля та середовища для випадку кореляцій поля малого радіуса. Зокрема розглянуто такі хвилі, що є результатом взаємодії звукових хвиль та поперечних хвиль кореляцій ЕМ поля, а також повздовжні хвилі середнього поля у плазмі з лише однією нерівноважною компонентою, що враховують наявність кореляцій поля.
11. Продемонстровано ефекти модуляції звуком середнього ЕМ поля та його бінарних кореляцій (акустооптична взаємодія). Передбачено ефект коливань зі звуковими частотами для кореляцій поля.

Основним результатом виконаної дисертаційної роботи є розширення інформації про електромагнітне поле шляхом вивчення властивостей його флуктуацій, що описані кореляційними функціями. Мета дисертаційного дослідження досягнута та усі поставлені задачі розв'язані.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. To kinetics of electromagnetic field in medium taking into account fluctuations // Питання атомної науки і техніки. - 2001. - №6(2). - С. 268-271.
2. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Classical fluctuation electrodynamics // Condensed Matter Physics - 2005. - Vol. 8, №4 (44). - P. 685-700.
3. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Лінійна флюктуаційна електродинаміка // Журнал фізичних досліджень. - 2006. - Т. 10, №1. - С. 12-23.
4. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Моди електромагнітного поля в рівноважній плазмі // Вісник Харківського ун-ту. Серія фізична. Ядра, частинки, поля. - 2004. - № 628, Вип. 2(24). - С.87-92.
5. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Опис електромагнітного поля напруженостями та однофотонною матрицею густини // Вісник Харківського ун-ту. Серія фізична. Ядра, частинки, поля. - 2004. - №642, №3(25). - С. 97-100.
6. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Вплив флуктуацій електромагнітного поля на коливання у плазмі // Вісник Харківського ун-ту. Серія фізична. Ядра, частинки, поля. - 2006. - №721, №1(29). - С. 61-66.

7. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Енергетичний спектр чорного випромінювання // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. - 2002. - Вип.9. - С. 69-73.
8. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Кінетична теорія електромагнітних процесів у рівноважному середовищі // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. - 2003. - №10. - С. 57-63.
9. Соколовський О. Й., Ступка А.А. Кінетична теорія електромагнітних процесів у гідродинамічному середовищі // Вісник Дніпропетровського ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. - 2004. - №11(2). - С.95-107.
10. Соколовський О. Й., Ступка А.А. Рівняння електродинаміки в гідродинамічному середовищу з урахуванням флуктуацій // Український математичний журнал. - 2005. - Т.57, №6. - С.852-864.
11. Sokolovsky A., Stupka A. Equations of electrodynamics with noncquilibrium fluctuations in many component hydrodynamic medium // Proc. 10-th International Conference Mathematical Methods of Electromagnetic Theory (MMET'10), Dnipropetrovsk. - 2004. - P. 234-236.
12. Sokolovsky A., Stupka A. Influence of correlations of the electric field on plasma waves// Proc. 13-th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2006). - Kiev. - 2006. - A157p.
13. Sokolovsky A., Stupka A. Waves of electromagnetic field correlations in hydrodynamic plasma // Proc. 11-th International Conference Mathematical Methods of Electromagnetic Theory (MMET'11). Kharkiv. - 2006. - P. 494-496.
14. Ступка А.А., Соколовский А.И. Уравнения электродинамики сплошных сред с учётом флуктуаций и приложения // Тези доповідей Всеукраїнської молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". - Дніпропетровськ. - 1999. - С. 30.
15. Ступка А.А., Соколовский А.И. Основное кинетическое уравнение для электромагнитного поля в равновесной среде // Тези доповідей II Всеукраїнської молодіжної науково-практичної конференції з міжнародною участю "Людина і космос". - Дніпропетровськ. - 2000. - С. 40.
16. Ступка А.А., Соколовский А.И. Кинетика фотонов в равновесной среде при отличном от нуля электромагнитном поле // Тези доповідей III Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". - Дніпропетровськ. - 2001. - С. 38.
17. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Система рівнянь вихрової флуктуаційної електродинаміки // Тези доповідей V Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". - Дніпропетровськ. - 2003. - С. 18.
18. Ступка А.А., Соколовский А.И. Уравнения для электромагнитного поля и его флуктуаций в неравновесной среде // Сборник тезисов. Десятая Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-10). - Часть 1. - Москва (Россия). - 2004. - С. 104-105.

19. Ступка А.А., Соколовський О.Й. Система рівнянь для опису акустооптичної взаємодії // Тези доповідей VI Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". - Дніпропетровськ. - 2004. - С. 70.

20. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Equations of electrodynamics in hydrodynamic medium taking into account nonequilibrium fluctuations //Book of abstracts. International Conference "Recent Trends in Kinetic Theory and its Applications". - Kiev. - 2004. - P. 62-64.

21. Sokolovsky A., Stupka A. Equations of electrodynamics of continuous media taking into account nonequilibrium correlations// Online Abstract Book. 22nd International Conference on Statistical Physics (STATPHYS 22). - http://www.physics.iisc.in/~statphys22/right.htm - P. 202.

22. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Kinetics of electromagnetic field in medium taking into account nonequilibrium correlations // Book of abstracts. International Bogolyubov Kiev Conference "Modern Problems of Mathematical and Theoretical Physics". - Kyiv. - 2004. - P. 73-74.

23. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Рівняння лінійної електродинаміки рівноважної плазми з урахуванням флуктуацій поля // Тези доповідей VII Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції "Людина і космос". - Дніпропетровськ. - 2005. - С. 57.

24. Соколовський О.Й., Ступка А.А. Хвилі малої амплітуди у гідродинамічній слабкойонізованій плазмі з урахуванням флуктуацій електромагнітного поля // Тези доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції "Людина і Космос". - Дніпропетровськ. - 2005. - С. 61.

25. Ступка А.А., Соколовський О.Й. Врахування ефекту запізнювання повільної слабкої електромагнітної взаємодії // Збірник тез. Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (ЕВРИКА - 2005). - Львів. - 2005. - С. 28-29.

26. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Influence of fluctuations of electromagnetic field on charged liquid // Book of abstracts. 3rd International Conference Physics of Liquid Matter: Modern Problems. - Kiev - 2005. - P. 66.

27. Sokolovsky A., Stupka A. Equations of nonlinear plasma electrodynamics with nonequilibrium correlations of the field // Book of abstracts. Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications, Annual Conference in Ukraine. - Lviv. - 2005. - P. 173.

28. Ступка А.А., Соколовський О.Й. Класична флуктуаційна електродинаміка // Тези доповідей VIII міжнародної науково-практичної конференції "Людина і Космос". - Дніпропетровськ. - 2006. - С. 49.

29. Ступка А.А., Соколовський О.Й. Хвилі флуктуацій // Тези доповідей VIII міжнародної науково-практичної конференції "Людина і Космос". - Дніпропетровськ. - 2006. - С. 50.

30. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Influence of correlations of the electric field on plasma waves // Book of abstracts. 13-th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2006). Part I. - Kiev. - 2006. - P. 57.

31. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Connected oscillations of plasma temperature and correlations of electromagnetic field// Book of abstracts. 13-th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2006). Part I. - Kiev. - 2006. - P. 58.

32. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Equations for correlations of the electromagnetic field in hydrodynamic plasma// Book of abstracts. 13-th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2006). Part I. - Kiev. - 2006. - P. 59.

33. Sokolovsky A.I., Stupka A.A. Classical nonlinear optics taking into account fluctuations of electromagnetic field // Book of abstracts. International Workshop "Nonlinear physics and mathematics". - Kiev. - 2006. - P. 44.

34. Sokolovsky A., Stupka A. Waves of electrodynamics correlations in hydrodynamic medium// Book of abstracts. International Conference "Condensed matter: theory and applications". - Kharkov. - 2006. - P. 97.

35. Sokolovsky A., Stupka A. Electromagnetic field correlations and sound waves // Book of abstracts. 2nd International Conference on Quantum Electrodynamics and Statistical Physics QEDSP2006. - Kharkov. - 2006. - P. 139-140.

36. Sokolovsky A., Stupka A. Kinetics theory of electromagnetic processes in medium // Book of abstracts. 2nd International Conference on Quantum Electrodynamics and Statistical Physics QEDSP2006. - Kharkov. - 2006. - P. 157-158.

Ступка А.А. Кінетична теорія електромагнітних процесів в середовищі.

Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук. Спеціальність 01.04.02 – теоретична фізика. Дніпропетровський національний університет, Дніпропетровськ, 2007.

На основі метода скороченого опису Боголюбова знайдено статистичний оператор системи, яка складається із заряджених частинок та електромагнітного (ЕМ) поля. Обрано оператори параметрів скороченого опису поля, що задовольняють умову Пелетмінського-Яценка.

Отримано рівняння руху для опису ЕМ поля у рівноважному середовищі з урахуванням кореляцій поля. Показано, що ці рівняння дають відомі результати теорії перенесення випромінювання – при слабкій неоднорідності поля, та теорії Власова із самоузгодженим полем – після додаткового розвинення за взаємодією. Отримано часове рівняння для твірного функціонала ЕМ поля у нерелятивістському випадку. Передбачено нові рухи для кореляційних функцій поля.

Отримано замкнену систему рівнянь гідродинаміки плазми та флуктуаційної електродинаміки. Завдяки урахуванню кореляційних функцій ЕМ поля уточнено частоти звукових та плазмових хвиль. Передбачено аналогічний акустооптичному ефект для кореляційних функцій, а також коливання кореляцій поля зі звуковими частотами. В однорідному випадку передбачено коливання енергій підсистем поля та плазми з подвоєною плазмовою частотою при нехтуванні зіткненнями.

Ключові слова: метод скороченого опису Боголюбова, рівняння руху, електромагнітне поле, кореляційні функції поля, акустооптичний ефект для кореляцій, гідродинаміка плазми, флуктуаційна електродинаміка, звукові хвилі, плазмові хвилі.

Stupka A.A. Kinetic theory of electromagnetic processes in medium.

Manuscript. Thesis for a physics and mathematics candidate degree on speciality 01.04.02. - Theoretical physics. Dnipropetrovsk National University, Dnipropetrovsk, 2007.

On the basis of the Bogolyubov reduced description method statistical operator of the system, which consists of the charged particles and electromagnetic (EM) field, is found. The consideration is simplified because operators of reduced description parameters of the field satisfy the Peletminsky-Yatsenko condition.

Equations of motion for description of the EM field in equilibrium medium taking into account correlations of the field are received. It is shown that these equations give the known results of the theory of radiation transport – at weak nonhomogeneity of the field, and the Vlasov theory with the self-consistent field – after expansion in interaction. Time equation for generating functional of the EM field is received for nonrelativistic case. New motions of the correlation functions of the field are predicted.

Closed system of equations of hydrodynamics of plasma and fluctuation electrodynamics is obtained. Frequencies of sound and plasma waves are corrected due to the account of correlation functions of the EM fields. Effect for correlation functions similar to acousto-optic one, and also oscillations of correlations of the field with sound frequencies are predicted. In homogeneous case neglecting by the collisions oscillations of energies of subsystems of the field and plasma with double plasma frequency are predicted.

Keywords: the Bogolyubov reduced description method, equation of motion, electromagnetic field, correlation functions of the field, acousto-optic effect for correlations, hydrodynamics of plasma, fluctuation electrodynamics, sound waves, plasma waves.

Ступка А.А. Кинетическая теория электромагнитных процессов в среде.

Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математичесих наук. Специальность 01.04.02. - теоретическая физика. Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск, 2007.

Изучена нерелятивистская среда, которая состоит из заряженных и нейтральных частиц. Рассмотрены случаи равновесной среды с постоянной или переменной температурой, а также среды, что находится на гидродинамическом этапе эволюции и описывается плотностями числа частиц, массовой скоростью и температурой (или этими величинами для отдельных компонент). Частота электромагнитного (ЭМ) взаимодействия, которую можно оценить как ленгмюровскую, считалась значительно меньшей характерных частот движений в среде, поэтому параметрами описания ЭМ поля избраны пространственные его корреляционные функции. Обзор литературы по теме

показал актуальность описания ЭМ поля с учетом его корреляций. Наиболее полную информацию о системе содержит ее статистический оператор, который найден при указанных условиях методом сокращенного описания неравновесных состояний Боголюбова. Определенные упрощения при этом возникли потому, что операторы параметров сокращенного описания поля удовлетворяют условию Пелетминского-Яценко. Использованы истинные начальные условия для подсистемы ЭМ поля вместо эффективных. Удалось отказаться от конкретизации вида статистического оператора свободного поля.

Построена замкнутая система уравнений для бинарных корреляционных функций поля в равновесной среде, в которую благодаря учету динамики ЭМ поля вошли свободные члены, соответствующие в стохастических подходах силам Ланжевена. Показано, что кинетические коэффициенты этих уравнений отвечают обычным проводимостям. Найдены движения корреляций поля, аналогичные плоским волнам среднего поля. Показано, что описание ЭМ поля лишь нормальной функцией Вигнера (без учета аномальных функций распределения) требует слабой пространственной неоднородности ЭМ поля. Предложен метод построения эффективного гамильтониана ЭМ поля в равновесной среде, введены фотоны и плазмоны и продемонстрирован на примере этой системы корпускулярно-волновой дуализм. Показано, что после полного разложения по взаимодействию результаты теории Власова для среднего поля полностью идентичны результатам диссертации. Предложена нерелятивистская неквантовая теория возмущений, с использованием которой найдена функция распределения системы с точностью до третьего порядка по слабому ЭМ взаимодействию. Построено временное уравнение для производящего функционала корреляций поля, что обобщает уравнения нелинейной оптики на случай учета корреляций. При учете всех порядков теории возмущений показана гауссовость равновесного ЭМ поля. Установлено, что дисперсионная зависимость корреляционных моментов поля может быть идентичной произведению средних значений ЭМ поля, что означает возникновение частот, аналогичных частотам комбинационного рассеяния. Изучен случай однородного и изотропного ЭМ поля, когда среднее поле отсутствует, а среда квазиравновесна. Показано возникновение связанных колебаний бинарных корреляций ЭМ поля и температуры среды, что отвечает перетеканию энергии между подсистемами. Построена замкнутая система из уравнений гидродинамики для среды с единой массовой скоростью и температурой с учетом диссипации и уравнений для среднего ЭМ поля и его бинарных корреляций с точностью до второго порядка по взаимодействию. Для корреляций малого радиуса изучены волны малой амплитуды в системе, которые при пренебрежении взаимодействием переходят в звуковые и электромагнитные волны. Продемонстрирован эффект акустооптического взаимодействия и аналогичный эффект для корреляций ЭМ поля. Аналогично (но в пренебрежении диссипацией) изучен случай гидродинамики с различными скоростями и температурами компонент среды. С той же точностью построена замкнутая система уравнений для среднего продоль-

ного электрического поля и его бинарных корреляций в плазме, в которой одна компонента пребывает на гидродинамическом этапе эволюции, а остальные – в равновесии в пренебрежении диссипацией. В указанной системе для корреляций поля малого радиуса изучено изменение частоты плазменных волн.

Основным результатом выполненной работы является расширение информации об ЭМ поле путем изучения свойств его флуктуаций, которые описаны корреляционными моментами.

Ключевые слова: метод сокращенного описания Боголюбова, уравнения движения, электромагнитное поле, корреляционные функции поля, акустооптический эффект для корреляций, гидродинамика плазмы, флуктуационная электродинамика, звуковые волны, плазменные волны.

Підписано до друку 16.05.2007. Формат 60x90 1/16. Папір друкарський, друк плоский. Умовн. друк. аркушів – 1. Тираж 100 примірників. Замовлення № 52.

Друкарня ДНУ. 49050, м. Дніпропетровськ, вул. Наукова,5