

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Андреева Павла Александровича
на тему: «Представление квантовой механики многочастичных систем в
терминах эволюции коллективных наблюдаемых»
по специальности 1.3.3 – «теоретическая физика»

Представленная диссертация посвящена исследованию методов перехода от многочастичной квантовой механики к теории материального поля. Поэтому в диссертации представлен метод проецирования многомерной эволюции в физическое пространство с единовременным построением функций, необходимых для описания коллективных процессов. Такой подход вдохновлен концепцией цепочек Боголюбова-Борна-Грина-Кирквуда-Ивона и приводит к бесконечной системе гидродинамических уравнений. Рассматривая различные физические системы и процессы в них, автор диссертации предлагает различные методы замыкания систем уравнений и построения моделей разной степени точности даже для одинаковых систем. Это позволило дать строгое обоснование известных моделей и вывести оригинальные модели, обобщающие принятые подходы. Общий метод реализован на конкретных примерах волновых процессов в спин-поляризованном вырожденном электронном газе, в конденсате Бозе-Эйнштейна нейтральных атомов, системах вырожденных спин-поляризованных Ферми атомов и в бозон-фермионных смесях.

Актуальность избранной темы обусловлена широким применением в современной физике методов коллективных квантовых возбуждений. Иллюстрацией последних является теория фазовых переходов Ландау в приложении к сверхпроводимости и сверхтекучести, теория спиновых волн в магнетиках, твист-троника в многослойных графенах и другое.

Диссертация Андреева П.А. состоит из введения, четырех глав и библиографии из 326 наименований. **Во введении** дается общая характеристика работы, приводятся положения, выносимые на защиту, обсуждаются цели и задачи работы, обоснована актуальность, представлен обзор современного состояния исследований в данной области, отражены полученные результаты и личный вклад автора.

В первой главе развит метод многочастичной квантовой гидродинамики систем квантовых частиц, который позволяет осуществить явный переход из многомерного конфигурационного пространства в трёхмерное физическое пространство. С этой целью вводится совокупность материальных полей, таких как концентрация, поле скоростей, тензор кинетического давления и т.д. Эти физические величины определены через многочастичную волновую функцию, а точнее через многочастичный волновой спинор, т.к. значительное внимание уделено динамике частиц со спином. Таким образом, микроскопическое многочастичное уравнение Шредингера определяет эволюцию макроскопических функций. Таким образом, **получены уравнения квантовой гидродинамики**, которые включают уравнение непрерывности, уравнение Эйлера, содержащее спин-спиновое взаимодействие и потенциал Бома, и уравнение эволюции плотности спина. Последнее является обобщением уравнения Блоха. Кроме того, оно является упрощенной версией уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнения Баргмана-Мишеля-Телегди. Однако полученное уравнение содержит тепловую часть спинового тока и квантовую часть спинового тока, связанного с потенциалом Бома. Развитие метода квантовой гидродинамики систем заряженных частиц с полуцелым спином выполнено в двух направлениях. Первое традиционно предполагает, что частицы каждого сорта рассматриваются как единая подсистема. Второе направление рассматривает частицы одного сорта с определенной проекцией спина как отдельную подсистему. Таким образом, система электронов в электронно-ионной плазме рассматривается как две взаимодействующие подсистемы с

переменным числом частиц. Предложенный метод позволяет определить квантовую функцию распределения как среднее значение соответствующего оператора по многочастичной функции распределения. Таким образом, возникает метод получения квантовых кинетических уравнений. Более того, получены квантовые кинетические уравнения для подсистем электронов с определенной проекцией спина. Также показано, что динамика спина описывается векторной функцией распределения. При этом получены соответствующие кинетические уравнения, учитывающие взаимодействие магнитных моментов частиц и несохранение числа частиц в подсистемах электронов.

Во второй главе развит метод многочастичной квантовой гидродинамики для систем нейтральных квантовых частиц, в которых короткодействующее взаимодействие играет основную роль. Предположение о короткодействии взаимодействия между частицами позволяет развить процедуру вывода вклада главного поля и поправок к нему. Такая процедура имеет смысл разложения по радиусу взаимодействия. При рассмотрении системы бозонов в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна уравнения гидродинамики, полученные в приближении главного поля, приводят к известному уравнению Гросса-Питаевского. Это показывает корректность развиваемой методики. Этот результат возникает в первом порядке по радиусу взаимодействия. Получен вклад изотропного и анизотропного короткодействующего взаимодействия бозонов в третьем порядке по радиусу взаимодействия. Этот вклад характеризуется дополнительными константами взаимодействия, одна для изотропной части, а другая -- для анизотропной части. В обоих случаях получено соответствующее слагаемое в уравнении Эйлера, пропорциональное третьей производной квадрата концентрации. Для спин-поляризованных фермионов ненулевой вклад изотропного взаимодействия получен в третьем порядке по радиусу взаимодействия. Он характеризуется той же константой взаимодействия, что и бозоны. Слагаемое в уравнении Эйлера получено как величина, пропорциональная первой

производной от произведения концентрации и кинетического давления. Показано, что фермионы с различными проекциями спина дают ненулевой вклад во взаимодействия, как в первом, так и в третьем порядках по радиусу взаимодействия. Взаимодействие определяется парциальными концентрациями фермионов с определенной проекцией спина. Получена **квантовая гидродинамика нейтральных фермионов с отдельной спиновой эволюцией**. Выведен вклад эволюции давления в динамику спин-поляризованных фермионов. Вычислен вклад короткодействующего взаимодействия в уравнение эволюции давления, которое возникает в третьем порядке по радиусу взаимодействия. Также рассмотрена расширенная система уравнений квантовой гидродинамики для бозонов в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна, где учтена эволюция давления и потока давления. Найден вклад диполь-дипольного взаимодействия бозонов в рамках расширенной системы уравнений гидродинамики.

В третьей главе рассмотрено приложение моделей, разработанных во второй главе, к волновым процессам в вырожденном частично спин-поляризованном электронном газе. Показано, что методы квантовой гидродинамики и квантовой кинетики с отдельной спиновой эволюцией приводят к **предсказанию спин-электрон-акустических волн**. Это продольные волны плотности электронного газа, в которых парциальные плотности электронов с различной проекцией спина имеют различную амплитуду и фазу. Дисперсионные зависимости этих волн вычислены для плазмы различного состава и геометрии. Методами квантовой кинетики с отдельной спиновой эволюцией получено влияние динамики магнитных моментов плазмы на поперечные волны с учетом влияния аномальной части магнитного момента. Обнаружено, что возникает тонкая структура циклотронных волн, состоящая из трех дисперсионных кривых вблизи каждого циклотронного резонанса. Кроме того, найдена волна на частоте, близкой к разности циклотронных частот заряда электрона и магнитного момента, вызванная аномальной частью магнитного момента.

В четвертой главе представлено приложение моделей, разработанных во второй главе, к волновым процессам в ультрахолодных квантовых газах. Поучено влияние взаимодействия, вычисленного в третьем порядке по радиусу взаимодействия, на дисперсию волн в вырожденных спин-поляризованных фермионах с учетом уравнения эволюции тензора давления. Отдельно рассмотрены частично спин-поляризованные фермионы в первом порядке по радиусу взаимодействия, где показан вклад отдельной спиновой эволюции в дисперсионные характеристики волн. **Показано существование двух типов солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна.** Первое решение обусловлено короткодействующим взаимодействием в третьем порядке по радиусу взаимодействия и его конкуренцией с квантовым потенциалом Бома. Второе решение возникает в расширенной модели бозонов, включающей в себя эволюцию давления и потока давления. Эта модель учитывает вклад квантовых флуктуаций, связанных с диполь-дипольным взаимодействием.

В качестве замечаний к диссертации следует отметить следующее.

- 1. Затухание спин-электрон-акустических волн без учета столкновений обсуждается недостаточно подробно. Автор просто использует процедуру обхода полюса по аналогии с затуханием Ландау.*
- 2. Квантовый потенциал Бома выводится автором при получении уравнений квантовой гидродинамики, однако его вклад в поведение дисперсионных зависимостей практически не обсуждается.*

Однако указанные замечания не умаляют **значимости и научной новизны диссертационного исследования.** Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью математических методов, использованных автором.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к докторским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3 – «теоретическая физика» (по физико-математическим

наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и её содержание согласуется с содержанием автореферата.

Таким образом, соискатель Андреев Павел Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «теоретическая физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор Института физических исследований и технологий Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы

РЫБАКОВ Юрий Петрович

Контактные данные:

тел.: +7 (916) 262-55-36, e-mail: rybakov_yur@rudn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3,
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ имени Патриса
Лумумбы, Институт физических исследований и технологий
Тел.: +7 (916) 262-55-36; e-mail: rybakov_yur@rudn.ru

Подпись профессора Рыбакова

Ученый секретарь Российского
дружбы народов имени Патриса
профессор

Гурылев

15 мая 2024 г.