

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию Андреева Павла Александровича
«Представление квантовой механики многочастичных систем
в терминах эволюции коллективных наблюдаемых»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика»

Развитие аналитических методов для квантовомеханического описания систем большого числа частиц является одним из важных направлений в статистической механике. Эти методы широко используются при исследовании свойств волновых процессов и механизмов образования структур в различных физических системах.

Автором настоящей работы развит оригинальный подход для получения замкнутых моделей для исследования квантовых плазмоподобных сред и ультрахолодных атомарных квантовых газов.

В рамках диссертационной работы П. А. Андреева предложены новые микроскопически обоснованные модели конденсата Бозе – Эйнштейна нейтральных атомов, газов вырожденных нейтральных фермионов, бозон-фермионных смесей, и спиновых эффектов в системах вырожденных заряженных фермионов. Предсказаны новые эффекты в таких системах, в частности, новые типы волн и солитонов.

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и Списка использованных источников из 326 наименований. Объем диссертации составляет 336 страниц текста, включая 71 иллюстрацию.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов исследования, анализ современного состояния исследований в данной области, полученные результаты и личный вклад автора.

В **первой главе** диссертации описаны развиваемые методы получения систем уравнений макроскопической эволюции для систем заряженных частиц, где основной вклад в динамику вносят дальнодействующие взаимодействия. Даны основные определения и представлен метод вывода уравнений баланса числа частиц, импульса и спина, основанных на многочастичном уравнении Паули. Вычисления выполнены на примере электрон-позитронной плазмы, в которой учтены кулоновское, спин-спиновое и аннигиляционное взаимодействия. Исследовано влияние этих взаимодействий на динамические свойства спиновой завихренности и гидродинамической спиральности, обусловленной спиновыми степенями свободы. Получены нелинейные уравнения Паули, соответствующие уравнениям баланса.

Разработан аппарат квантовой гидродинамики, в которой электроны рассматриваются как два сорта частиц с противоположно направленными спинами. При этом показано, что процессы переворота спина приводят к дополнительным слагаемым в уравнениях баланса, связанных с несохранением числа частиц определенного сорта.

Выведены квазиклассические уравнения кинетики, учитывающие разделение электронов на два сорта частиц. Как часть этой системы получено кинетическое уравнение для векторной функции распределения спина.

Найден вклад спин-спинового взаимодействия в динамику функций распределения частиц каждого сорта и в процессы перехода электронов между подсистемами.

Во второй главе представлено развитие методов квантовой гидродинамики для вырожденных атомарных газов. Рассмотрены системы вырожденных фермионов, со спином $1/2$, и системы вырожденных бозонов, со спином 0 , находящихся в состоянии конденсата Бозе – Эйнштейна. При рассмотрении фермионов основное внимание уделено системам фермионов с одинаковой проекцией. Получены уравнения баланса числа частиц, импульса и давления. Вычислен вклад короткодействующего взаимодействия в эти уравнения. Развита метод разложения плотности силы и плотности потока силы по малому параметру, определенному как отношение радиуса действия потенциала к среднему расстоянию между частицами. Первые отличные от нуля слагаемые возникают в третьем порядке по радиусу взаимодействия. Плотность силы в уравнении баланса импульса получена в виде пространственной производной от произведения концентрации на кинетическое давление. Плотность потока силы оказывается пропорциональна комбинации кинетического давления и поля скоростей. Предложенные модели бозонов ограничиваются уравнениями баланса числа частиц и импульса. Также рассмотрена анизотропная часть короткодействующего двухчастичного взаимодействия. Изотропная часть взаимодействия проявляется в первом и третьем порядках по радиусу взаимодействия. В то же время, анизотропия проявляется в третьем порядке по данному радиусу.

Рассмотрены бозоны, обладающие дипольным моментом, для которых важно учитывать диполь-дипольное взаимодействие. На этом примере получена расширенная гидродинамическая модель конденсата Бозе – Эйнштейна, включающая уравнение эволюции давления и потока давления. В этом режиме уравнение эволюции давления бозонов не содержит вклада от

взаимодействия. В свою очередь уравнение эволюции потока давления содержит вклад взаимодействия даже в пределе равной нулю температуры. Это дает гидродинамическую модель квантовых флуктуаций, связанных с диполь-дипольным взаимодействием.

В третьей главе изучены волновые процессы в системах заряженных частиц и влияние спиновых степеней свободы на возможность возникновения новых волновых процессов. Показано, что квантовая гидродинамика электронов с отдельной спиновой эволюцией приводит к предсказанию спин-электрон-акустических волн. Таким образом, возникают волны плотности заряда, в которых электроны со спином вверх колеблются в противофазе с электронами со спином вниз относительно фона неподвижных ионов. Вычислена дисперсионная зависимость объемных спин-электрон-акустических волн. Получено дисперсионное уравнение для таких волн, распространяющихся под произвольным углом по отношению к магнитному полю в электростатическом пределе. Дисперсионное уравнение состоит из двух ветвей спин-электрон-акустических волн. Отдельно рассмотрен вклад поперечного электрического поля в свойства данных волн при их распространении перпендикулярно внешнему магнитному полю. Изучены особенности спин-электрон-акустических волн в электрон-позитрон-ионной плазме. Предсказано существование поверхностной спин-электрон-акустической волны. Исследованы дисперсионные характеристики спин-электрон-акустических волн в вырожденном двумерном электронном газе. В приближении слабой нелинейности предсказано существование спин-электрон-акустического солитона. Построена кинетическая теория спин-электрон-акустических волн и исследовано их бесстолкновительное затухание. При распространении волн вдоль внешнего магнитного поля спин-электрон-акустические волны являются продольными, подобно ленгмюровским и ион-акустическим волнам.

Показано, что спиновые степени свободы оказывают влияние на свойства поперечных циклотронных волн. С помощью методов физической кинетики показано, что существование аномальной части магнитного момента электрона приводит к тонкой структуре циклотронных волн.

В четвертой главе исследованы волновые процессы в квантовых газах, обусловленные эффектами третьего порядка по радиусу взаимодействия. Рассмотрены спектры коллективных возбуждений бозонов, фермионов и бозон-фермионных смесей, с учетом эволюции давления фермионов.

Изучена нелинейная динамика возбуждений в конденсате Бозе – Эйнштейна и предсказано формирование светлого солитона в системе бозонов с отталкивающим взаимодействием. Это становится возможным благодаря преобладанию взаимодействия над квантовым потенциалом Бома. Исследовано влияние анизотропного взаимодействия между бозонами на свойства этого солитона. Также учтено влияние фермионной компоненты на свойства солитона при его появлении в бозон-фермионных смесях.

Рассмотрены коллективные возбуждения в системе вырожденных частично поляризованных фермионов с отдельной спиновой эволюцией. Предсказано возникновение солитона в дипольном конденсате Бозе – Эйнштейна благодаря квантовым флуктуациям.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Отмечу основные замечания к диссертации.

1. Светлый солитон в конденсате Бозе – Эйнштейна и его обобщения для более сложных систем рассмотрены в пределе возмущений малой амплитуды. Решение во всех случаях выполнено методом масштабирования переменной. Это предсказание было бы более обоснованным, если бы дополнительно подтверждалось другими

методами, позволяющими рассмотреть возмущения конечной амплитуды.

2. При предсказании солитона, формируемого квантовыми флуктуациями, в целях получения аналитического уравнения связывающего тензор потока давления с давлением для нелинейного решения большой амплитуды автор пренебрегает большим количеством слагаемых. В особенности сильно упрощены уравнение эволюции давления и уравнение эволюции потока давления. Здесь дано качественное обоснование, но нет оценок величин отброшенных слагаемых.

Вместе с тем, указанное замечание не умаляет значимости диссертационного исследования. Результаты работы опубликованы в таких престижных научных журналах, как *Phys. Rev. A.*, *Phys. Rev. B*, *Phys. Rev. E*, *Mod. Phys. Lett. B.*, *Eur. Phys. J. D.*, *Phys. Plasmas*, *Annals of Physics* и др., доложены на различных международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3 – «теоретическая физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

Доктор физ. – мат. наук,

профессор,

начальник отдела

НИЦ «Курчатовский институт»



С.В. Сазонов

12.09.2024

Сазонов Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук,
начальник отдела Курчатовского ядерно-физического комплекса

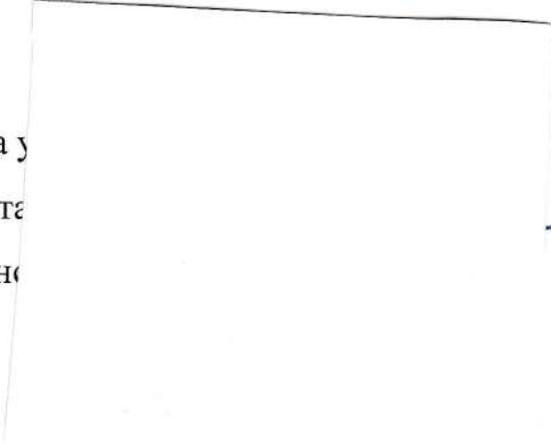
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

тел.: +7(499)1967662, e-mail: sazonov_sv@nrcki.ru

Подпись С.В. Сазонова у

Главный ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»



К.Е. Борисов

13.09.2024

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.,
тел.: +7 (499) 196-95-39, факс.: + 7 (499) 196 17-04, e-mail: nrcki@nrcki.ru