

ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию 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»

Теоретическое и экспериментальное исследование волновых процессов в ультрахолодных квантовых газах и плазменных средах является одним из ключевых направлений современной физики. Такие работы важны как с фундаментальной точки зрения, так и, в перспективе, - с прикладной. Представленная диссертация посвящена теоретическому исследованию волновых процессов, солитонов в квантовых газах и плазменных средах с особым акцентом на методы построения замкнутых моделей, что несомненно является актуальным направлением.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 336 страницах текста, включая 71 иллюстрацию и список литературы из 326 наименований.

Во **Введении** сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, наряду с полученными результатами приведены научные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации новых результатов, изложено современное состояние исследований затронутых в диссертации научных направлений, отмечается личный вклад автора.

В **первой главе** развиты методы квантовой гидродинамики с отдельной спиновой эволюцией. Эти методы представляют большой интерес при рассмотрении систем заряженных частиц, таких как электрон-ионная плазма и электрон-позитрон-ионная плазма, в которых каждый тип

частиц со спином  $1/2$  рассматривается как совокупность двух сортов частиц. Идеи квантовой гидродинамики с отдельной спиновой эволюцией обобщены для получения аналогичной модели в физической кинетике. Эти результаты являются частным следствием более общей теории по представлению эволюции квантовых систем в терминах коллективных наблюдаемых. В первой главе этот метод продемонстрирован для систем частиц, отличительной чертой которых является дальнее действие и поэтому основным приближением при описании взаимодействия является приближение самосогласованного поля. Обменные поправки, которые дают зависимость от типа статистики, в этом случае не обсуждаются. Впрочем, особенности, обусловленные видом статистики явно обсуждаются во второй главе, где рассматривается противоположный предел - нейтральные частицы с короткодействующим взаимодействием.

Во **второй главе** разрабатываются методы квантовой гидродинамики для систем нейтральных частиц, с акцентом на физику ультрахолодных квантовых газов, причем результаты получены в рамках единого метода. При этом рассмотрены системы частиц, подчиняющихся различной статистике (бозоны и фермионы), причем межчастичное взаимодействие имеет различный характер - изотропное двухчастичное взаимодействие, анизотропное двухчастичное взаимодействие, трёхчастичное взаимодействие, диполь-дипольное взаимодействие. Анализируется роль квантовых флуктуаций. В каждом случае общая система уравнений для коллективных наблюдаемых замыкается путем приближенного вычисления двухчастичных корреляций в приближении слабонеидеального газа. Для каждого случая получена замкнутая система уравнений гидродинамики и, в некоторых из них, выведено, следующее из гидродинамики макроскопическое нелинейное уравнение Шредингера. В частности для бозонов с двухчастичным взаимодействием находящихся в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна получено известное уравнение Гросса-Питаевского. А при наличии трёхчастичного взаимодействия получен

известный вклад в виде нелинейности пятой степени в уравнении Гросса-Питаевского. Вторая глава диссертации, как и первая глава, посвящена выводу замкнутых систем уравнений квантовой гидродинамики. Применение этих моделей для исследования известных физических явлений и предсказание новых выполнено в последующих главах.

В третьей главе рассмотрены свойства волн в квантовых плазмopodobных средах, где квантовые эффекты проявляются через эволюцию спина и вклад квантового потенциала Бома в уравнения квантовой гидродинамики. При этом основные полученные результаты обусловлены спиновыми эффектами. Раздельная спиновая эволюция при наличии спиновой поляризации электронного газа приводит к существованию продольных спин-электрон-акустических волн. Большая часть третьей главы посвящена изучению свойств таких волн. Рассмотрено их распространение в направлении параллельном и перпендикулярном внешнему магнитному полю. Также проанализирован режим распространения спин-электрон-акустических волн с произвольным волновым вектором. Исследование выполнено для электрон-ионной и электрон-позитрон-ионной плазмы. В последнем случае, динамика позитронов также рассмотрена методом квантовой гидродинамики с раздельной спиновой эволюцией. Таким образом, показано, что в системе существуют две спин-акустических волны в электронной и позитронной компоненте. Если электрон-ионная плазма считается трёхмерной неограниченной средой, в ней распространяются объёмные спин-электрон-акустические волны. Также возможно распространение солитонов в случае полупространства, в котором, на границе возникает поверхностная спин-электрон-акустическая волна. Исследована спин-электрон-акустическая волна в двумерной электрон-ионной системе.

Методами квантовой гидродинамики и квантовой кинетики показано, что спиновые свойства электронов проявляются в изменении тензора диэлектрической проницаемости вырожденных плазмopodobных сред и

свойства поперечных волн, распространяющихся в таких средах. При «кинетическом» рассмотрении волн, распространяющихся параллельно внешнему магнитному полю, обнаружено расщепление каждой циклотронной волны на три с близкими частотами. При этом, принципиальным оказался учёт аномальной части магнитного момента электрона.

**В четвертой главе** представлен анализ волновых процессов в системах нейтральных вырожденных бозонов и фермионов. Основное внимание уделено изучению вклада взаимодействия в третьем порядке по радиусу взаимодействия на свойства волн. Рассмотрены волны малой амплитуды в системах фермионов, бозонов и бозон-фермионных смесей. Наиболее важным результатом является предсказание ярко-подобного солитона, в конденсате Бозе-Эйнштейна, с отталкивающим взаимодействием между атомами. Наряду с изучением короткодействия в третьем порядке по радиусу взаимодействия, рассмотрены эффекты диполь-дипольного взаимодействия. В режиме сильной нелинейности, получено решение, в виде солитона, обусловленное квантовыми флуктуациями, в дипольном в конденсате Бозе-Эйнштейна. При этом предполагается, что эволюция давления и потока давления обусловлена диполь-дипольным взаимодействием при пренебрежении кинематическими эффектами, существующими в уравнениях эволюции этих физических величин.

**В Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

Все полученные в диссертации результаты без сомнения являются достоверными. Там, где это возможно, они полностью подтверждаются явными квантово-механическими вычислениями. Результаты исследований опубликованы в ведущих международных журналах, доложены на многих международных конференциях. Их обоснованность обусловлена использованием надежных аналитических методов вычисления.

Из замечаний к содержанию диссертации необходимо отметить следующее:

1. Вывод уравнений квантовой гидродинамики с отдельной спиновой эволюцией представлен для случая одного электрона с последующим включением кинетического давления на основе сравнения с многочастичными подходами. Я согласен, что для упрощения понимания структуры предложенных уравнений — это вполне удачный методический шаг. В то же время, я предпочел бы видеть в тексте «полноценный» вывод. К тому же, это лучше бы отражало тему диссертации по представлению квантовой механики систем многих частиц, в виде эволюции функций, описывающих коллективные эффекты.
2. В диссертации предсказаны два типа солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна. Их происхождение связано с различными обобщениями уравнения Гросса-Питаевского, но изучено различными методами. Полная физическая картина могла бы сложиться при едином подходе к исследованию этих явлений. Это, в частности, позволило бы понять, являются ли предсказанные солитоны разными физическими явлениями или это различные проявления одной нелинейной волны.
3. При исследовании бозе-эйнштейновского конденсата рассматривается несколько видов взаимодействий, хотя не рассматриваются случаи, когда хотя бы два из них действуют одновременно. Этот недостаток является критическим для слабонеидеального спинорного бозе-газа с дальнедействующим диполь-дипольным взаимодействием. При этом одновременный учет изотропного короткодействия является ключевым, например для объяснения нетривиального поведения голдстоуновской спиновой ветви спектра элементарных возбуждений наряду с

беляевской звуковой ветвью. Впрочем, автор спинорные газы фактически не рассматривает.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляет значимости диссертационного исследования. 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 пп. 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.

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 кафедры теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования "Московский физико-технический институт"  
(национальный исследовательский университет)

ПОЛИЩУК Илья Яковлевич

Контактные данные:

тел.: +7(916)1051532, e-mail: iurpouishchuk@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

141700, Московская обл., г. Дол