

“У Т В Е Р Ж Д А Й”

Директор

Учреждения Российской академии наук

Институт спектроскопии РАН

член-корр. РАН, проф. Виноградов Е.А.



“ 6 ” мая 2014 г.

### Отзыв

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук на диссертацию Погосова Вальтера Валентиновича «Сверхпроводники и разреженные сверхтекущие бозе-системы: от микро- к макроуровню», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Одной из важнейших задач современной физики твердого тела является исследование мезоскопических систем. Интерес к изучению таких систем связан как с быстрым прогрессом в методах миниатюризации и перспективами их использования в технологических приложениях новых типов, так и с необычными физическими свойствами данных объектов. Особый интерес вызывает изучение систем, демонстрирующих явление бозе-конденсации, среди которых можно выделить мезоскопические и наноструктурированные сверхпроводники, конденсаты атомов щелочных металлов в ловушках, системы экситонов. Именно подобным системам и посвящена диссертация Погосова Вальтера Валентиновича, в которой особое внимание уделено актуальному вопросу о том, как макроскопические свойства возникают по мере увеличения размеров образца.

Диссертация состоит из пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Первая глава представляет собой введение. В нем обосновывается актуальность исследования, представлен исторический и литературный обзор, сформулированы основные результаты и приведен список публикаций автора по теме диссертационной работы.

Во второй главе исследуется куперовское спаривание в системе, описываемой редуцированным гамильтонианом теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шраффера (БКШ). Для подобных гамильтонианов известно точное решение задачи через так называемые уравнения Ричардсона. В данном подходе число частиц в системе полагается

постоянным, что, в частности, позволяет применять его для описания сверхпроводящих корреляций в ультрамалых металлических гранулах. Уравнения Ричардсона могут быть решены аналитически в весьма ограниченном числе случаев. Автором предложен оригинальный аналитический подход к данной проблеме. Предлагается не решать уравнения непосредственно, а реконструировать решения, используя известную электростатическую аналогию для этих уравнений и переходя затем к вероятностному представлению. Подход имеет очевидные аналогии с методом Лафлина описания дробного квантового эффекта Холла. Автором проведены вычисления для низколежащей части спектра в пределе системы большого размера и подтверждено согласие со среднеполевыми результатами обобщенной теории БКШ даже в пределе перехода от режима локальных пар к плотному режиму БКШ при нулевой температуре. Предложена интерпретация результатов теории БКШ для энергии основного состояния, в которой фигурирует масштаб энергии, отличающийся от сверхпроводящей щели и представляющей из себя так называемую энергию связи единичной пары. Для систем ультрамалого размера предложено использовать симметрию между электронами и дырками для описания перехода от режима БКШ в макроскопической системе к режиму, в котором имеется доминирование квантовых флуктуаций. Автором предложена формула для энергии конденсации, применимая вдоль всего перехода, и показано, что формула теории БКШ для энергии конденсации макроскопической системы перестает быть точной, когда расстояния между соседними одноэлектронными уровнями энергии становятся сопоставимым с энергией связи единичной пары, гораздо меньшей, чем сверхпроводящая щель.

В третьей главе диссертации исследуются свойства мезоскопических систем с размерами, сопоставимыми с длиной когерентности. Это - низкотемпературные сверхпроводники, гибридные структуры сверхпроводник-ферромагнетик и конденсаты атомов щелочных металлов в ловушках. Сначала изучаются равновесные фазовые диаграммы, а затем – неравновесные и флуктуационные явления. Так, исследованы свойства сверхпроводников с подавленной поверхностной сверхпроводимостью и показано, что в них не так сильно выражена дискретность зависимости намагниченности от внешнего поля. Построено описание поведения во внешнем поле сверхпроводящих мезоскопических дисков и колец с магнитной точкой посередине и представлено объяснение некоторых экспериментов с такими структурами. Предложено, как можно использовать магнитную точку для наведения требуемого сдвига фазы параметра порядка в кольце, что может быть использовано для создания кубита. Исследованы вихревые фазовые диаграммы вращающихся конденсатов в ловушке, в которых имеется несколько компонент параметра порядка. Приведено качественное объяснение для наблюдаемых серий фазовых переходов. Далее, в этой же главе предложено объяснение недавних экспериментов по исследованию входа и выхода вихрей Абрикосова в ультрамалые сверхпроводящие островки из свинца. Показано, что наблюдающееся в эксперименте подавление поверхностного барьера может объясняться термоактивацией вихря через этот барьер, несмотря на то обстоятельство, что речь идет о низкотемпературных сверхпроводниках. Для описания этого процесса предложен новый оригинальный подход. Затем рассматривается возможность квантового туннелирования вихря через барьер и представлены критерии перехода от термоактивации к туннелированию. Для островков треугольной формы, которые получаются естественным образом в процессе роста, предсказано существенное усиление температурных флуктуаций в углах таких наноструктур. Эти результаты важны не только с точки зрения фундаментальной науки, но и для приложений, в которых используются сверхпроводящие наноструктуры. В третьей главе также исследуется процесс проникновения вихря во вращающийся конденсат в ловушке. При этом показано, что это происходит посредством образования пар вихрей и антивихрей на периферии системы. Выявлена роль поверхностных мод в

этом процессе. Кроме того, анализируется процесс плавления оболочек вихревых кластеров в конденсате. Показано, что температура плавления существенно зависит от симметрии кластеров, несмотря на то, что расстояния между вихрями сопоставимы с размерами вихревых сердцевин. Представлены оценки для температур плавления. Наконец, исследуются температурные флуктуации в конденсатах с несколькими компонентами параметра порядка. Показано, что в них могут возникать сильные флуктуации разностей фаз этих компонент, что ведет, в частности, к флуктуациям намагниченности и к возможности спонтанного рождения кинков и антикинков.

В четвертой главе диссертации рассматриваются свойства макроскопических сверхпроводников, в которых, тем не менее, определенную роль продолжает играть мезоскопический масштаб – длина когерентности. Она, в частности, определяет структуру сердцевин вихрей Абрикосова. Полученные результаты приложимы и для случая конденсатов атомов щелочных металлов в присутствии оптической решетки, также создающей искусственные центры пиннинга. Сначала в данной главе рассматривается сверхпроводник, свободный от центров пиннинга, для которого предложена единая формула для намагниченности, применимая во всех полях от нижнего критического поля до верхнего критического поля. Формула выведена с использованием вариационного метода для параметра порядка в единичной ячейке вихревой решетки, который позволяет адекватно описать структуру сердцевины вихря и ее влияние на намагниченность. Затем рассматриваются структура и свойства вихревой решетки в присутствии периодических (искусственных) и случайных центров пиннинга. Оказывается, что даже при отсутствии беспорядка структура вихревой решетки может быть весьма сложной из-за конкуренции между треугольной симметрией решетки и симметрией системы центров пиннинга, расположенных в узлах квадратной решетки. Наложение дополнительного беспорядка приводит к еще большему богатству фазовой диаграммы. В частности, при усилении беспорядка разупорядочение вихревой решетки может происходить в два этапа, на каждом из которых в системе распространяется свой тип дефектов решетки. Наконец, в этой же главе изучаются динамические режимы, реализующиеся в системе при пропускании через нее транспортного тока. Построена простая модель, результаты которой хорошо согласуются с данными численных экспериментов. Отдельно можно упомянуть, что использованный способ комбинирования численного эксперимента с аналитическими вычислениями, когда таковые представилось возможным провести, позволил весьма полно и глубоко понять свойства изученной сложной системы.

В пятой главе диссертации исследуются системы экситонов Френкеля, для которых применен способ учета отклонений от бозевской статистики, который был ранее предложен для описания многочастичных свойств экситонов Ванье-Мотта и нелинейных оптических эффектов в полупроводниках. В этом методе не производится переход к бозонизированным операторам рождения и уничтожения экситонов, а трудности, возникающие в этом случае, обходятся с использованием некоторых коммутационных соотношений для этих операторов и гамильтониана. В результате оказывается возможным вычисление средних от различных квантово-механических операторов на волновых функциях, соответствующих произвольному количеству экситонов. В диссертации в качестве приложения данной техники вычислена энергия основного состояния системы с произвольным числом экситонов Френкеля. Показано существование определенной аналогии с конденсатом куперовских пар в случае редуцированного гамильтониана БКШ.

В качестве замечаний к диссертации можно отметить следующее.

В главе 2 при исследовании корреляций в сверхпроводниках ультрамалого размера используется модель с равноудалёнными уровнями энергии одночастичных состояний. Следовало бы, по крайней мере, обсудить влияние реальной статистики уровней.

В главе 3 практически не обсуждается вопрос о том, как можно исследовать в эксперименте описываемые флуктуационные явления в конденсатах атомов щелочных металлов.

В главе 4 точность вариационного метода для вычисления намагниченности обсуждается лишь для сверхпроводников с большими значениями параметра Гинзбурга-Ландау. Остается неясным, какова точность в случае, если этот параметр близок к критическому значению. В той же главе совсем не затронут вопрос о том, какая статистика была набрана для результатов численного эксперимента. Неясно, достаточно ли ее для количественного сравнения данных численного моделирования и аналитического рассмотрения.

Исследование, представленное в главе 5, не выглядит полным. Предложенный метод применен к вычислению, фактически, всего одной величины.

Отмеченные замечания не являются существенными и по большей части относятся лишь к форме изложения. Они не снижают положительную оценку диссертации в целом. Полученные результаты и развитые методы представляют несомненный интерес и могут быть использованы как для дальнейшего развития теории мезоскопических систем, так и для описания соответствующих экспериментов и разработки технологических приложений.

На основании вышесказанного можно сделать следующее заключение: диссертационная работа Погосова Вальтера Валентиновича «Сверхпроводники и разреженные сверхтекучие бозе-системы: от микро- к макроуровню» имеет несомненную научную и практическую ценность. Работа выполнена на высоком теоретическом уровне, содержит новые идеи и подходы. Результаты, приведенные в диссертации, докладывались на международных и российских конференциях и были опубликованы в международных и российских рецензируемых научных журналах.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Диссертация Погосова Вальтера Валентиновича удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Заведующий лабораторией спектроскопии наноструктур

Института спектроскопии РАН

профессор МФТИ

Ю.Е.Лозовик

Научный доклад В.В. Погосова по диссертационной работе и отзыв о диссертации заслушаны и обсуждены на семинаре лаборатории спектроскопии наноструктур Института спектроскопии РАН.

Протокол №1 от 23 апреля 2014 г.

Подпись зав.лаб. спектроскопии наноструктур Института спектроскопии РАН  
проф.Ю.Е.Лозовика подтверждаю

Ученый секретарь ИСАН



Перминов Е.Б.