

Отзыв официального оппонента

*на диссертационную работу Погосова Вальтера Валентиновича
“Сверхпроводники и разреженные сверхтекучие бозе-системы: от
микро- к макроуровню”, представленную на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук по специальности
01.04.02 – теоретическая физика.*

В диссертации Погосова В.В., представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика», приведены результаты исследований по ряду современных направлений теории сверхпроводимости и сверхтекучести. Спектр решенных задач довольно широк: от физики вихрей в сверхпроводниках и сверхтекучих системах до микроскопической теории сверхпроводимости в системах с фиксированным числом частиц и теории экситонов малого радиуса. Актуальность темы данных исследований не вызывает сомнений, поскольку изучение основных особенностей перехода от микро – к макросистемам в присутствии сверхпроводящего спаривания, физики резистивного состояния сверхпроводников в магнитном поле имеет большое значение как с фундаментальной точки зрения, так и для целого ряда перспективных приложений. Статьи по этой тематике постоянно появляются в ведущих российских и зарубежных изданиях. Часть диссертации направлена на решение фундаментальных задач теории сверхпроводимости в мезоскопических системах, основанное на точном подходе Ричардсона. Вопросы эти в последние годы привлекают внимание как теоретиков, так и экспериментаторов в связи с переходом между сверхпроводящими состояниями с сильно и слабо перекрытыми волновыми функциями пар (переход между режимами Бозе-Эйнштейновской конденсации и БКШ). Важны эти вопросы и для понимания конкуренции размерного квантования и сверхпроводимости в малых частицах. К очевидной специфике сверхпроводящих и сверхтекучих систем малого размера относятся сильные флуктуации параметра порядка и нетривиальные вихревые решения. В последние 10-15 лет мы наблюдаем некоторый ренессанс этой тематики, связанный безусловно с успехами эксперимента. Диссертационная работа В.В.Погосова содержит весьма своевременные теоретические предсказания и в этой области. Затрагиваются в диссертации в существенной степени и проблемы пиннинга, актуальность которых в

реальных экспериментах трудно переоценить. Задача о составных частицах в квантовомеханической системе имеет естественно более широкую общность, чем конкретный вопрос о куперовских парах в сверхпроводнике. Актуальна она, в частности, и при исследовании физики экситонных состояний в полупроводниках. Широта научных интересов автора диссертации проявилась здесь замечательным образом – вопросы экситонной физики также нашли свое отражение в одной из глав. Для решения поставленных задач диссертации автор использовал разнообразные теоретические подходы, включая как феноменологическую теорию Гинзбурга – Ландау, так и методы микроскопической теории конденсированных сред.

Основное содержание диссертации изложено в 5 главах. Первая из них является вводящей и содержит общую характеристику работы, обзор литературы, краткое описание новизны диссертации и ее основных результатов.

Вторая глава полностью посвящена изложению работ автора по анализу сверхпроводящего состояния в подходе Ричардсона. Автору удалось предложить оригинальный вероятностный подход к вычислению различных величин в теории Ричардсона. Основа этого подхода – введение некоторого аналога гиббсовской вероятности, что позволяет делать вычисления без непосредственного решения уравнений Ричардсона. В дальнейшем в данной главе автор обращается к рассмотрению систем с достаточно малой концентрацией электронов проводимости (уровень Ферми близок к дну зоны) или малой концентрацией дырок (уровень Ферми близок к потолку зоны). Сделанные автором наблюдения о симметрии этих задач при замене электронов на дырки представляются верными. Далее автор вводит отличное от стандартного определение энергии конденсации пары: отличие заключается в дополнительном экспоненциальном множителе, связано оно с тем, что автор определяет число пар как число всех электронов в слое Дебая вокруг уровня Ферми, а не в слое толщиной, определяемой сверхпроводящей щелью. Автор здесь уделяет особое внимание критерию разрушения сверхпроводимости за счет размерного квантования: согласно его выводам, малый размер сверхпроводящей частицы оказывает разрушающее влияние на сверхпроводимость при значительно больших размерах частицы, чем это следует из критерия Андерсона.

В третьей главе автор приводит результаты своих работ по вихревым состояниям в малоразмерных сверхпроводящих и сверхтекучих системах. Очевидно, что вихревые

структуры в таких образцах должны быть крайне чувствительны к граничным условиям. Анализ этого явления и его роли в формировании фазовой диаграммы вихревых состояний выполнен автором представляются новым и интересным. Выполненные автором расчеты влияния магнитной точки на фазовые диаграммы малых сверхпроводящих колец и дисков не только представляют теоретически интерес, но и очень важны для понимания целого ряда экспериментов. Существенное усложнение физики вихревых состояний автор предсказывает для вращающихся спиновых конденсатов атомов щелочных металлов в ловушках, где предполагаемый параметр порядка имеет пять комплексных компонент. Представленные расчеты являются новыми. Было бы весьма полезно в этой части диссертации привести экспериментальные доводы в пользу реалистичности рассматриваемых моделей и их следствий (при их наличии). Оставшаяся (весьма объемная) часть этой главы посвящена исследованию влияния термических (и отчасти квантовых) флуктуаций параметра порядка на вихревые структуры в различных сверхпроводящих и сверхтекучих системах. Отметим здесь, что автором для описания флуктуаций вихрей использован оригинальный подход, основанный не на рассмотрении вихрей как частиц с флуктуирующим положением, а на анализе флуктуаций амплитуд гармоник с разными завихренностями. В случае малого числа гармоник этот подход позволяет развить эффективное упрощенное описание. В этом плане он аналогичен подходу А.И.Буздина и А.Варламова для описания флуктуаций в сверхпроводящем кольце [Phys. Rev. B 89, 076601, 2002]. Расчеты, сделанные автором для задачи о флуктуационном преодолении барьера на вход вихря, представляются новыми и полезными для понимания эксперимента. Жаль, что рассмотрение квантовых флуктуаций не выполнено также в рамках модели флуктуаций амплитуд гармоник: такое обобщение подхода автора на квантовый случай было бы полезно. Динамика мод параметра порядка учтена лишь в рамках модели с вязким диссипативным членом, что очевидно предполагает бесщелевой характер сверхпроводимости. В третьей главе содержится также результат о локальном усилении сверхпроводящих флуктуаций в малом образце, являющимся следствием особенностей геометрии образца (углов). Для сверхтекучих конденсатов в потенциале ловушки автор предлагает сценарий образования вихревого состояния, основанный на образовании пары вихрь – антивихрь и последующем разделении пары с уходом антивихря на периферию системы.

В четвертой главе рассмотрен ряд важных в практическом отношении вопросов теории вихревых решеток в макроскопических сверхпроводниках. В частности, автором предложено интересное обобщение хорошо известной модели Клема для изолированного вихря на случай вихревой решетки в широком диапазоне магнитных полей. Основой предлагаемого рассмотрения является метод Вигнера – Зейтца. Получена хорошая интерполяционная зависимость для намагниченности вихревой решетки. В данной главе исследована также задача о структуре вихревой решетки в присутствии квадратной решетки центров пиннинга. Нетривиальный ответ в этой задаче очевидным образом связан с тем, что в отсутствие пиннинга вихри располагаются в правильную треугольную решетку. Автором дополнительно учтено влияние беспорядка, построены разнообразные фазовые диаграммы, на основе численных расчетов выполнен анализ динамики вихрей в таких системах в транспортном токе.

Пятая глава стоит, на мой взгляд, несколько в стороне от основного содержания диссертации: она посвящена экситонам Френкеля. Идея автора заключается в выводе адекватных правил коммутации для операторов рождения – уничтожения экситонов с учетом их составного характера и, следовательно, очевидных отклонений от Бозе – статистики. Автор естественно достиг поставленной цели, хотя стоит отметить несколько технический характер полученных результатов и отсутствие приложения их к вычислениям измеримых физических величин.

Достоверность основных выводов, сформулированных диссертантом, обеспечивается правильным выбором необходимых теоретических методов исследования и апробацией работы на российских и международных конференциях. Новизна и практическая значимость полученных результатов, подтверждаются достаточным количеством публикаций в ведущих физических журналах.

Вместе с тем по диссертации необходимо сделать некоторые замечания:

1. Представляется, что подход Ричардсона, разработанный для описания системы с заданным числом частиц, должен быть наиболее эффективен в прагматическом плане для анализа физики эффекта четности в сверхпроводниках (зависимости характеристик системы от четности числа электронов, контролируемого, например, в грануле, которая находится в условиях кулоновской блокады). Эта тематика, к сожалению, совершенно не освещена в диссертации.

2. В рамках предложенного автором вероятностного подхода к вычислению различных величин в теории Ричардсона он вводит аналог гиббсовской вероятности, что позволяет делать вычисления без непосредственного решения уравнений Ричардсона. Представляется, однако, что ответ в данном случае будет существенно зависеть от выбора эффективной температуры, которая принимается равной константе притяжения между электронами. Такой выбор эффективной температуры выглядит несколько произвольным и не ясно, почему он должен приводить к правильным ответам.

3. Мне представляется, что утверждение автора о том, что малый размер сверхпроводящей частицы оказывает разрушающее влияние на сверхпроводимость при значительно больших размерах частицы, чем это следует из критерия Андерсона, требует дальнейших пояснений. В критерии Андерсона межуровневое расстояние сравнивается со сверхпроводящей щелью, а автор предлагает сравнивать его с вводимой им энергией конденсации пары (значительно меньшей щели). Однако, справедливость критерия Андерсона представляется вполне очевидной, если мы рассмотрим конкуренцию андреевского рассеяния на потенциале щели и нормального рассеяния на границах образца в формировании спектра квазичастиц малой гранулы. Автор не указывает, в каких измеримых величинах должен проявиться новый критерий, что затрудняет оценку справедливости его выводов.

4. Модель расчета вязкости при определении динамических уравнений на амплитуды флуктуирующих гармоник с разной завихренностью в главе 3 представляется неполной, поскольку представляется, что автор в своих вычислениях учел лишь омические потери из-за нормальных токов, и пренебрег вкладом в вязкость, связанным непосредственно с динамикой параметра порядка. Было бы уместным и сравнительно несложным получить динамические уравнения на амплитуды гармоник непосредственно из замкнутой динамической теории (например, нестационарной модели Гинзбурга - Ландау).

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации. В целом, следует отметить, что диссертационная работа Погосова В.В. является существенным вкладом в развитие нового направления – физики мезоскопической сверхпроводимости и сверхтекучести. Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Оценивая диссертацию Погосова В.В. в целом, можно заключить, что она

соответствует всем требованиям Положения ВАК России о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, и соискателю может быть присвоена ученая степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика».

21 мая 2014г.

Зам. директора
Института физики микроструктур РАН
доктор физико-математических наук

А.С.Мельников

"Подпись А.С. Мельникова удостоверяю"

Ученый секретарь Института физики микроструктур РАН



кандидат физико-математических наук

Д.А.Рыжов