

119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 53,
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.
диссертационный совет Д.002.023.02
при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию ПОГОСОВА Вальтера Валентиновича «Сверхпроводники и разреженные сверхтекучие бозе-системы: от микро- к макроуровню», *представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 01.04.02 - теоретическая физика)*

Актуальность. Развитие экспериментальных технологий позволило в последнее десятилетие интенсивно изучать сверхпроводящие и сверхтекучие свойства систем малого размера (всего несколько длин когерентности). К такого сорта системам относятся сверхпроводящие гранулы, гибридные сверхпроводящие наноструктуры, атомарные холодные газы, экситоны в полупроводниковых квантовых ямах, поляритоны в микрорезонаторах и т.д. Основной новый вопрос, который такие структуры позволяют детально изучить - это как сверхпроводящие/сверхтекучие корреляции в таких системах зависят не только от традиционных внешних параметров (температуры и магнитного поля), а и от размера системы. Например, одним из ярких эффектов, связанных с конечностью системы, является возможность существования многоквантового вихря в сверхпроводнике малых размеров. В диссертационной работе представлены результаты решения ряда фундаментальных задач, относящихся к перечисленным выше системам малых размеров. Во второй главе диссертации представлен метод решения уравнений Ричардсона для модели БКШ (в нульмерном приближении). Учитывая, что модель БКШ в нульмерном приближении является частным случаем так называемого универсального гамильтониана, широко сейчас используемого для описания квантовых точек, полученные автором результаты являются безусловно актуальными. Результаты третьей главы по изучению свойств сверхпроводящих структур и сверхтекучих конденсатов с размерами порядка нескольких длин когерентности являются актуальными из-за большого количества имеющихся в настоящее время

экспериментов в этих системах. В главе 4 автором получен ряд результатов о вихревых решетках в макроскопических сверхпроводниках. Наиболее актуальный результат этой главы - это вариационный метод вычисления обратимой намагниченности в магнитном поле между нижним и верхним критическими полями. Этот результат важен для количественного описания имеющихся экспериментов. В пятой главе с помощью оригинальной диаграммной техники вычислена энергия основного состояния экситонной системы с учетом (в первом порядке) межэкситонного взаимодействия. Этот результат несомненно актуален в связи с активным экспериментальным изучением экситонных конденсатов. Все полученные в диссертации результаты позволяют более глубоко понять физику явлений в сверхпроводящих и сверхтекучих системах, что открывает возможности для технологических приложений, в том числе для сверхпроводящей электроники. Таким образом, **актуальность** работы не вызывает сомнения.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе впервые подробно изучен ряд принципиально важных эффектов и получены новые оригинальные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Впервые предложен метод нахождения решений уравнений Ричардсона в термодинамическом пределе с помощью анализа интегралов сельберговского типа. Показано, что в системах малых размеров приближение среднего поля перестает работать, когда типичное расстояние между уровнями становится порядка энергии связи пары, которая параметрически меньше сверхпроводящей щели. Предложен и проанализирован механизм проникновения вихрей в бозе-конденсат через образование пары вихрь-антивихрь внутри конденсата и последующим уходом антивихря на бесконечность. Этот механизм отличает задачи о вихревой фазовой диаграмме структур сверхпроводник-ферромагнетик (в которых имеется резкая граница системы) и атомные ловушки с бозе-конденсатом (в которых граница плавная). Детально исследованы механизмы проникновения вихря в сверхпроводящие островки малых размеров (порядка длины когерентности). Показано, что термоактивационный механизм, существенный при высоких температурах, позволяет качественно объяснить недавние экспериментальные результаты. Сделаны оценки, показывающие, что при более низких температурах механизм, связанный с квантовыми флуктуациями, станет возможно экспериментально наблюдать. Предложена вариационная модель для вычисления обратимой намагниченности сверхпроводника второго рода во всем диапазоне внешних магнитных полей между нижним и верхним критическими полями, в случае когда их отношение велико. Этот результат носит важное практическое значение, так как позволяет количественно описывать большое количество

экспериментальных данных. Развито многочастичное описание (диаграммная техника) экситонов Френкеля (составных бозонов) и вычислена энергия основного состояния с учетом взаимодействия экситонов в первом порядке по их взаимодействию. Эти результаты, а также другие результаты диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые. Этим определяется **научная новизна** работы. Автор проводит аналитические расчеты, используя проверенные методы теоретической физики, такие как анзац Бете, диаграммная техника: уравнения Гинзбурга-Ландау и Гросса-Питаевского. Там, где провести строгие аналитические расчеты не представляется возможным, автор использует вариационный подход. Имеется хорошее согласие полученных результатов с экспериментом и численными расчетами других авторов. Поэтому не возникает сомнений в **достоверности** полученных результатов.

Научная и практическая значимость В диссертации детально исследован целый ряд новых физических эффектов, с подробным анализом их микроскопических механизмов и возможности практического применения. Во второй главе диссертации представлен метод решения уравнений Ричардсона для модели БКШ в нульмерном приближении в термодинамическом приближении. Учитывая, что уравнения Ричардсона являются частным случаем уравнений Бете-анзаца, а предложенный метод их решения строится на изучении сельберговских интегралов, указывая на возможную нетривиальную математическую структуру уравнений Ричардсона, научная значимость результатов второй главы очевидна. В третьей главе изучаются свойства сверхпроводящих структур и сверхтекучих конденсатов с размерами порядка нескольких длин когерентности. При этом для описания этих систем развит вариационный подход, позволяющий количественно рассчитывать их свойства и сравнивать с экспериментальными данными. В этом состоит научная значимость результатов третьей главы. Результаты третьей главы имеют также практическую значимость. Например, автором предсказано усиление флуктуаций в углах сверхпроводящих наноструктур, что необходимо учитывать при создании сверхпроводящих фотодетекторов. В главе 4 изучаются вихревые решетки в макроскопических сверхпроводниках. К наиболее научнозначимым и практически важным результатам этой главы можно отнести вариационный метод вычисления обратимой намагниченности в магнитном поле между нижним и верхним критическими полями, а также результаты про вихревые решетки в присутствии периодического и случайного потенциалов. Эти результаты важны для количественного описания экспериментов и понимания механизмов, ограничивающих величину критического тока. В пятой главе построена оригинальная диаграммная техника для

описания композитных (состоящих из двух фермионов) бозонов. С помощью этой техники вычислена энергия основного состояния экситонной системы с учетом (в первом порядке) межэкситонного взаимодействия. Учитывая достаточно большое количество в природе систем составных бозонов (экситоны в полупроводниковых структурах, возбуждения в режиме квантового эффекта Холла и др.) развитие удобной техники для описания таких систем является важной задачей современной теоретической физики. Поэтому научная значимость результатов пятой главы несомненна. Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что научная и практическая значимость всех результатов диссертации высока и несомненна.

Развитые диссертацией методы и подходы могут быть использованы для количественного описания разнообразных явлений в сверхпроводящих и сверхтекучих системах, ограниченной геометрии. Результаты диссертации В. В. Погосова могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области теоретической физики сверхпроводящих и сверхтекучих систем и ведущих разработку сверхпроводящих приборов и устройств (ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ИС РАН, НЦ КИ ПИЯФ, МГУ, ИФМ РАН, ИФП СО РАН, ФИАН, ИФТТ РАН, ИРЭ РАН, ИФМ УРО РАН и др.).

Диссертация В. В. Погосова написана ясным языком и хорошо иллюстрирована. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты.

Замечания. По диссертации следует высказать несколько вопросов и замечаний, не имеющих принципиального характера:

- В главе 2 показывается, что теория БКШ перестает работать, когда типичное расстояние между уровнями становится порядка отношения квадрата сверхпроводящей (объемной) щели и энергии Дебая. В тоже время в известной работе А.Ларкина и К.Матвеева (Phys. Rev. Lett. 78, 3749 (1997)) было показано, что БКШ работает до тех пор, пока типичное расстояние между уровнями не станет порядка сверхпроводящей. Как соотносятся эти два результата?
- В главе 3 с помощью вариационного подхода изучаются свойства вихревого состояния в сверхпроводящих системах малого размера в пределе большого отношения глубины проникновения и длины когерентности (λ карра). При этом вариационная процедура проводится численно. Чем такой полуаналитический-

получисленный подход лучше прямого численного решения уравнений Гинзбурга-Ландау? Каким параметром контролируется точность вариационного метода? Есть ли при фиксированном радиусе R ограничение на максимально возможную величину завихренности вихря? Если да, то было бы полезно обсудить это в тексте диссертации.

- В главе 3 изучается подавление барьера для входа/выхода вихря при наличии диссипации. Для описания последней используется модель Калдейра-Леггета (ур. 3.79). В модели Калдейра-Леггета координата частицы взаимодействует с баней осцилляторов. А что в рассматриваемой задаче играет роль такой бани? Почему координаты вихря входят в действие квадратично, а не более общим способом?
- В главе 4 строится вариационное обобщение модели Клема для решетки вихрей. Почему производная параметра порядка на границе ячейки должна обращаться в нуль (вторая часть ур. 4.11)? На рисунке 4.1 представлена зависимость намагниченности от поля при $\kappa_{\text{para}} = 100$. Соответствует ли такое значение κ_{para} какому-то реальному сверхпроводящему соединению? Если да, то было бы полезно указать это в тексте диссертации.
- В главе 5 обсуждается диаграммная техника для экситонов Френкеля, основанная на работе с операторами рождения и уничтожения экситонов. Как соотносится эта техника с техникой, предложенной С. Дикманом и соавторами (см. например, Phys. Rev. B 71, 241310(R) (2005)) для экситонов в двумерном электронном газе в сильном перпендикулярном магнитном поле? Появляются ли в формуле 5.124 диссертации степени N большие второй в следующих порядках по взаимодействию?

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 30 научных работах в ведущих отечественных и зарубежных журналах, доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа В. В. Погосова является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты. На основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Диссертационная работа удовлетворяет всем

требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **01.04.02 - теоретическая физика**.

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау
Российской академии наук

Бурмистров Игорь Сергеевич
30 мая 2014

Подпись И.С. Бурмистрова заверяю
ученый секретарь
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
к.х.н. С.А. Крашаков

