

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Побойко Игоря Валерьевича
«Кинетические явления в квантовых неупорядоченных системах»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Анализ поведения многочастичных систем со взаимодействием является основным направлением теоретической физики. Изучение влияния эффектов беспорядка и квантовых эффектов на макроскопические характеристики объектов уже не первое десятилетие остается одной из главных тем исследований как в теории, так и в эксперименте. Начиная с основополагающей работы Андерсона о локализации одночастичных состояний в системе с беспорядком, теоретический интерес вызывают квантовые интерференционные явления и их вклад в транспортные свойства проводящих материалов. Известно, что на локализационные явления сильно влияет понижение пространственной размерности системы, так что в двух и особенно в одном пространственном измерении эффекты локализации максимальны. За годы изучения таких систем теоретики создали ряд эффективных методов и выработали адекватные характеристики описания соответствующих явлений. Оказалось, что в зависимости от силы взаимодействия и беспорядка и соотношения между ними возможны различные сценарии поведения физических систем. В представленной диссертации рассмотрены некоторые конкретные примеры модельных систем в пониженной размерности и разной степени взаимодействия и беспорядка. При этом получены новые значимые результаты и сделаны интересные качественные выводы. Подобное исследование имеет фундаментальное значение и представляет очевидный практический интерес с точки зрения возможных приложений. Поэтому можно сказать, что **актуальность** диссертации И.В. Побойко не вызывает сомнений.

Основные результаты диссертации состоят в теоретическом исследовании транспортных свойств ряда квантовых мезоскопических моделей с беспорядком, уточнении ряда количественных характеристик таких систем, а также в разработке аналитического подхода к коллективному пиннингу конечной плотности сверхпроводящих вихрей в тонких пленках с беспорядком. Этим определяется **научная новизна** работы.

В частности, в первой главе диссертации изучена сильнокоррелированная одномерная система бесспиновых фермионов с беспорядком, эквивалентная цепочке спинов $S=1/2$ с XXZ типом обмена и случайным магнитным полем. В отсутствие беспорядка и взаимодействия имеется частично-дырочная симметрия. Для такого «чистого» случая спектр вблизи уровня Ферми имеет линейный характер с поправками, кубическими по импульсу. Учет взаимодействия удобнее делать в формализме бозонизации, позволяющем

эффективно пересуммировать бесконечные ряды теории возмущений. Однако кривизна фермионной дисперсии при этом формулируется нетривиально, а именно, как распад бозонных мод. Без беспорядка распад происходит на три бозона, беспорядок приводит к эффективному возникновению распада на два бозона. В главе исследуется возможность описания формы и ширины бозонного пропагатора в рамках самосогласованной процедуры в неравновесной технике Келдыша. При этом «чистый» случай и случай с беспорядком проанализирован отдельно. Найденные результаты затем используются для оценок спиновых корреляционных функций и транспортных свойств системы. Подобное изучение влияния кубических поправок к кривизне фермионного спектра сделано, по видимому, впервые.

Во второй главе исследуется модельная ситуация сверхпроводника с развитым беспорядком в состоянии «псевдощели», последняя понимается как подавление плотности состояний на уровне Ферми за счет комбинированного эффекта локализации электронных состояний и сверхпроводящих флуктуаций. Для описания спаренных электронов в сильном случайном потенциале используется спиновая модель, предложенная в хорошо известной работе Андерсона. Сначала анализ модели производится на основе приближения среднего поля, соответствующего усредненному локальному значению сверхпроводящего параметра порядка. В случае большого радиуса взаимодействия можно усреднить по беспорядку и найти уравнение самосогласования, решения которого вполне удовлетворительно описывают результаты численного моделирования задачи соискателем. В области окончания спектра, где уравнение самосогласования не может хорошо работать, имеются экспоненциальные «хвосты» плотности состояний, ширину которых автор оценивает с использованием числа Гинзбурга для флуктуационной области.

Для изучения парапроводимости проводится гораздо более сложный анализ на основе т.н. «семионного» представления Федотова и Попова для спиновых операторов. Полуфермионы или семионы характеризуются смешанной статистикой, позволяющей исключить из рассмотрения нефизические степени свободы при описании спиновых операторов в терминах фермионов. Этот трюк приводит к более сложным правилам в вычислениях, которые соискатель проводит в келдышевской технике, расцепляя четырехфермионные слагаемые в функционале действия. Результатом весьма продвинутых вычислений является важное утверждение, что в режиме сильного беспорядка («псевдощели») флуктуационная проводимость типа Асламазова и Ларкина имеет практически неизменный вид, даже в случае, когда обычная друдевская проводимость подавлена. Это происходит в широкой области температур вплоть до параметрически узкой окрестности (области Гинзбурга) точки фазового перехода, где становятся важны эффекты за рамками гауссова приближения.

В третьей главе изучено поведение системы сверхпроводящих вихрей в неупорядоченном сверхпроводнике второго рода при малых полях и температурах. Имеется кулоновское отталкивание вихревых трубок, дальнедействующего логарифмического в двумерии

характера, и цепляние за локальный беспорядок («пиннинг»). Модельное приближение заключается в сильном случайном потенциале для кора вихря и малой конечной концентрации дальнедействующих вихрей. Возникает модель стекла, которая анализируется методом реплик. Переходя к вспомогательным полям, автор получает локальное действие в терминах числа заполнения вихрей и мягких мод матричного репличного параметра порядка. Далее анализируется точка перехода в стекольное состояние, соответствующая спонтанному нарушению репличной симметрии. В результате в окрестности фазового стекольного перехода для эффективного действия оставляется только одна мягкая мода, и получается функционал Гинзбурга-Ландау (ГЛ), характеризующийся большой флуктуационной областью. Попытка рассмотреть действие ГЛ при низких температурах встречает формальную сложность за счет структуры кубических членов действия, однако соискатель показывает, что предположение об одноступенчатом нарушении репличной симметрии приводит к аналитически доступному решению, оказывающемуся хорошим численным приближением. Интересно, что критерий численного согласия соответствует найденному практически полному отсутствию экранировки кулоновского взаимодействия в низкотемпературном пределе.

В диссертационной работе развиты уже существующие методы анализа, а также предложены комбинации известных аналитических и численных методов. Полученные результаты имеют фундаментальное значение и могут быть использованы как для количественного описания, так и для предсказания качественных аспектов поведения неупорядоченных сверхпроводников. Все это определяет **научную и практическую значимость** работы.

В целом, диссертация написана ясным языком, сложные вычислительные детали подробно разобраны в нескольких приложениях.

По содержанию и оформлению диссертации можно сделать несколько замечаний.

1. Небольшое количество замеченных опечаток включает в себя систематическое написание фамилии «Стратанович», хотя правильно будет Стратонович. Это, очевидно, является следствием неправильного написания фамилии в англоязычной литературе.
2. В первой главе самосогласованная оценка для ширины пропагатора плотности в «чистом» случае выполняется, предположительно, вплоть до невзаимодействующего случая, $K=1$. Однако в последнем случае этот пропагатор вычисляется в явном виде в фермионном формализме и имеет нелоренцевский вид, в противоречии с исходным предположением. Соискателю следовало бы обратить внимание на это обстоятельство.

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на хорошем научном уровне. Научные положения и результаты диссертации достаточно хорошо аргументированы и обоснованы. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений.

Представленные результаты опубликованы в ведущих научных журналах и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях.

Диссертация И.В. Побойко на тему «Кинетические явления в квантовых неупорядоченных системах» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а соискатель Побойко Игорь Валерьевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Официальный оппонент

Зам.руководителя по науке Отделения Теоретической Физики
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
НИЦ «Курчатовский институт»

Доктор физ.-мат.наук
Аристов Дмитрий Николаевич

Россия, 188300, Ленинградская область,
г. Гатчина, Орлова роща, д. 1
НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ

08 декабря 2020 г.

Подпись Д.Н. Аристова заверяю:

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
КАДРОВ
ЗИНОВЬЕВА А.Н.
"08" ДЕКАБРЯ 2020

