

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Институт Теоретической Физики им. Л.Д. Ландау

Российской академии наук,
чл. корр. РАН, д.ф.-м.н.

В.В. Лебедев

2017 г.



Отзыв ведущей организации

на диссертацию Карпова Петра Игоревича

«Индукцированные сверхструктуры заряженных топологических дефектов

в низкоразмерных системах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертация П.И. Карпова посвящена исследованию сверхструктур заряженных топологических дефектов, которые могут быть созданы с помощью оптических или электрических импульсов, либо электростатическим полем. Такие структуры, как вихревые решетки и доменные стенки, могут приводить к появлению новых функциональных свойств материалов и образованию «скрытых» состояний вещества, поэтому их исследование представляется актуальным.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, двух приложений и списка литературы.

В *о введении* обосновывается актуальность исследования, формулируется цель работы и приводятся основные положения, выносимые автором на защиту.

Глава 1 посвящена общему введению в концепцию топологических дефектов со спонтанно нарушенной дискретной или непрерывной симметриями, а также обзору литературы, касающейся материалов, являющихся предметами исследования основной части диссертации. Хотя эта глава не содержит оригинальных результатов, полученных непосредственно диссертантом, хотелось бы отметить высокое качество изложения известных результатов, свидетельствующее о несомненном педагогическом таланте автора.

Глава 2 посвящена изучению индуцированных электрическим полем многовихревых магнитных структур в двумерных мультиферроиках. Сначала автор

описывает феноменологическая модель тонкой пленки магнитоэлектрического материала с анизотропией типа “легкая плоскость”. Далее обсуждается основная идея данной главы, а именно возможность создания магнитных вихрей и антивихрей с помощью неоднородного электрического поля в исследуемых материалах. Дело в том, что при наличии магнитоэлектрического взаимодействия магнитные вихри в пленке приобретают электрический заряд, пропорциональный топологическому заряду вихря и, тем самым, возникает интересная возможность управления магнитной подсистемой с помощью внешнего электрического поля. Поднося к пленке заряженную иглу СТМ, можно создать плотное скопление вихрей непосредственно под иглой. Важно, что в двумерной системе рождающиеся пары вихрь-антивихрь связаны дальнедействующим логарифмическим взаимодействием, не позволяющим образовавшимся антивихрям уйти на слишком далекое расстояние от своих партнеров-вихрей. В результате возникает интересное образование, напоминающее нейтральный двумерный атом, в котором вихри играют роль «протонов», образующих «ядро» и удерживаемых электрическим полем, создаваемым иглой. Антивихри же, играющие роль «электронов», этим полем, наоборот, отталкиваются и образуют оболочку на расстоянии, определяемом балансом между отталкивающим полем иглы и притягивающим полем ядра. Развивая эти идеи, диссертант строит теорию распределения вихрей по образцу в непрерывном приближении.

Для вычисления поляризуемости системы в слабом продольном электрическом поле в низкотемпературном пределе непрерывное приближение оказывается уже недостаточным. Автор исследует собственные значения гессиана (матрицы жесткости) системы антивихрей. При самых низких температурах, когда колебания всех отдельных антивихрей можно считать линейными, поляризуемость очень велика и не зависит от температуры. Однако уже при весьма низких температурах колебания, соответствующие самым мягким модам системы, становятся нелинейными и это приводит к уменьшению поляризуемости с ростом температуры. По-видимому, это уменьшение описывается степенной зависимостью. Хотя теоретический вывод этой зависимости основывается на ряде довольно грубых предположений, он подтверждается специально проделанными автором численными расчетами. Далее обсуждается высокотемпературный предел, и связанный с ним переход Березинского-Костерица-Таулесса, более подробно описанный в приложении А. Далее описываются процедура и результаты численного моделирования, подтверждающие полученные теоретические результаты. В заключении данной главы приводится обсуждение возможностей экспериментального наблюдения предсказанных эффектов и даются

оценки для электрического поля, необходимого для создания вихревых структур в мультиферроиках BiFeO_3 и TbMnO_3 .

В качестве замечаний по этой главе можно отметить следующее:

1. Как аналитическое, так и численное исследования температурной зависимости поляризуемости, проведенные в диссертации, состояли из двух частей: исследование спектра гессиана (оно проводилось достаточно аккуратно) и учет нелинейности. Последний сводился к введению фиксированного параметра обрезания колебаний L , одинакового для всех антивихрей (и, тем самым, для всех мод). Неясно, насколько это приближение является оправданным, в особенности для низкой температуры. К сожалению, проведенные численные расчеты не помогают ответить на это вопрос, так как они проводились только для линейной части системы (гессиана); никакие более реалистические модели нелинейности не рассматривались ни аналитически, ни численно.

2. Важная роль нелинейности колебаний, выявленная при исследовании низкотемпературной линейной поляризуемости системы, явно указывает на то, что ограничиваться линейной поляризуемостью для описания отклика системы на внешнее поле можно только при чрезвычайно слабых полях. Было бы очень интересно исследовать нелинейный по полю режим и – как минимум – выяснить, при каких полях нелинейными эффектами еще можно пренебречь.

Глава 3 посвящена исследованию фазовых переходов в ансамблях нейтральных, либо заряженных кинков, создаваемых с помощью оптической или электрической накачки в квазиодномерных проводниках с двукратно вырожденным основным состоянием. Анализ производится на основе отображения на эффективную модель Изинга, с зависящей от температуры константой продольного взаимодействия, определяемой самосогласованным образом. С ее помощью для случая нейтральных кинков вычисляются температуры двух фазовых переходов: обычного перехода типа Изинга (этот переход сопровождается связыванием кинков и антикинков, расположенных на одной цепочке, в пары), а также второго, низкотемпературного перехода прорастания солитонных доменных стенок в поперечном направлении. Этот второй переход возникает за счет топологического дальнегодействующего взаимодействия кинков, расположенных на соседних цепочках. Топологическое взаимодействие, будучи локально слабым (пропорциональным междоменному взаимодействию), линейно растет с расстоянием между кинками и, поэтому, приводит к конфайнменту. В случае заряженных кинков кулоновское взаимодействие препятствует возникновению макроскопических доменных стенок, вместо них образуются

бисолитонные диски конечных размеров (в случае слабого кулоновского взаимодействия) либо (при сильном кулоновском взаимодействии) система остается жидкостью из пар кинк-антикинк даже и при низких температурах. Дело в том, что кулоновское взаимодействие между плоскими объектами (так же, как и топологическое) линейно растет с расстоянием и, при достаточно большом радиусе диска становится доминирующим и препятствует дальнейшему его росту. Оценки для случая заряженных кинков даны в приложении Б, где найден максимальный радиус бисолитонных дисков. В оставшейся части данной главы приводятся результаты моделирования ансамбля кинков методом Монте-Карло для нейтральных и заряженных кинков в двух и трех измерениях. Наиболее интересный результат состоит в том, что даже локально слабое кулоновское взаимодействие подавляет низкотемпературный переход с образованием солитонных стенок, практически не оказывая влияния на высокотемпературный изинговский переход.

По этой главе у меня возникли следующие замечания:

1. Интересно было бы рассмотреть случай анизотропного тензора диэлектрической проницаемости и обсудить влияние этой анизотропии на формирование и характер взаимодействия бисолитонных дисков.

2. Кинки и антикинки, образующиеся в результате накачки, могут аннигилировать, если они находятся на одной цепочке близко друг к другу. Поэтому тенденция к связыванию кинков и антикинков в пары должна, с одной стороны, приводить к общему увеличению скорости аннигиляции, а, с другой стороны, к ее неравномерности: концентрации солитонов в упорядоченной и неупорядоченной фазах не будут находиться в термодинамическом равновесии друг с другом. Если аннигиляция происходит достаточно быстро, то упорядоченная фаза может быть сильно подавлена, так как аннигиляция происходит именно из нее. Следовало бы обсудить возможность этого неравновесного эффекта, либо продемонстрировать его несущественность. Последнего можно ожидать только если аннигиляция оказывается самой медленной стадией процесса: только в этом случае можно считать химические потенциалы кинков совпадающими в обеих фазах.

Глава 4 посвящена моделированию сетей и глобул заряженных доменных стенок, создаваемых в поляронной сверхрешетке 13-кратно вырожденной низкотемпературной фазы дисульфида тантала с помощью оптической или электрической накачки. Основной вопрос, исследуемый автором в данной главе – почему заряженные вакансии поляронной сверхрешетки, вместо того чтобы отталкиваться и образовывать еще более высокоуровневую сверхрешетку, на самом деле эффективно “притягиваются” и

выстраиваются в сети доменных стенок. Для описания системы применяется модель классического заряженного решеточного газа, используя которую, диссертант на качественном уровне дает ответ на поставленный вопрос. Когда вакансии находятся поблизости друг от друга (образуют глобулу), возникает возможность коллективизировать их заряды, отдавая их доменным стенкам. Поскольку заряд единичной доменной стенки составляет $1/13$ заряда единичной вакансии, кулоновская энергия системы стенок оказывается ниже энергии системы заряженных вакансий. При увеличении суммарного заряда системы за счет накачки, размеры глобулы увеличиваются и постепенно она занимает весь образец. При дальнейшем увеличении заряда система доменных стенок, которая внутри глобулы была достаточно неупорядоченной, приобретает некое подобие порядка и образует мозаичную структуру. С помощью среднеполевого анализа модели в диссертации найдена температура фазового перехода порядок-беспорядок. Прямым численным моделированием автор демонстрирует образование сетей доменных стенок, что согласуется с экспериментом.

Нужно подчеркнуть, что все рассмотренные в этой главе необычные и сложные явления оказываются возможными благодаря наличию большого параметра 13 (степени вырождения основного состояния).

В заключении представлены основные выводы диссертационной работы.

Отдельно хочется отметить хороший русский язык и почти полное отсутствие опечаток в диссертации. Вот те редкие опечатки, которые я обнаружил: пропущенный предлог “в” в начале фразы “Этом разделе мы опишем феноменологическую модель” на стр. 24; упоминание упорядоченной “изиновой” фазы (вместо изинговской) на стр. 96, “неизмеримой” фазы криптона на графите (вместо несоизмеримой) на стр. 127; а также неправильный предлог: “основаны в работе [155]” вместо “основаны на работе [155]” на стр. 116.

Отмеченные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Нужно подчеркнуть, что, несмотря на весьма сложный и «многосоставный» характер как физических объектов, так и теоретических построений, являющихся предметом диссертации, Автору в полной мере удалось представить их связное и внятное описание.

Диссертационная работа П.И. Карпова прошла неоднократную апробацию — материалы опубликованы в двух статьях *Physical Review B*, а также докладывались на 10 российских и международных конференциях, по результатам которых опубликованы

5 тезисов в сборниках трудов. Работа была доложена и обсуждалась на семинаре сектора квантовой мезоскопии ИТФ им. Ландау 01.12.2017.

Автореферат отвечает содержанию диссертации. Язык и стиль автореферата ясны и в меру лаконичны.

Работа отвечает требованиям п. 9. "Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а П.И. Карпов безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составил

Ведущий научный сотрудник

д. ф.-м. н.

эл. почта: iossel@itp.ac.ru

Иоселевич Алексей Соломонович

Подпись Иоселевича А.С. заверяю

Ученый секретарь

ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН



Крашаков С.А.

ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, г. Черноголовка, Московская обл., просп. Академика
Семенова, д. 1-А, 142432, Россия

Телефон: +7 (495) 702-93-17

Факс: +7 (495) 702-93-17

Электронная почта: office@itp.ac.ru