

**Отзыв официального оппонента по диссертации Ванькова Александра Борисовича на тему «Оптическая спектроскопия сильнокоррелированных двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»**

**Актуальность темы диссертации.** Исследования эффектов межчастичного взаимодействия в конденсированных средах представляют собой важнейшую, исключительно сложную и бурно развивающуюся область современной физики. Это обусловлено тем, что межэлектронные корреляции определяют основные свойства конденсированных сред, их энергетический спектр и элементарные возбуждения, отклик на внешние статические и переменные поля. Особенный интерес вызывают в этой связи именно двумерные системы, где роль кулоновского взаимодействия возрастает благодаря эффектам размерного квантования, а роль беспорядка, связанного с наличием ионизованных примесей, может быть снижена путем отделения слоев с донорами и акцепторами от области двумерного электронного газа.

К настоящему времени имеется множество экспериментальных реализаций двумерного электронного газа с высокой подвижностью носителей заряда. Гетероструктуры на основе  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  занимают уникальное место в этом списке: в таких системах имеется сильный оптический отклик за счет прямозонного спектра с разрешенным междозонным переходом, можно достичь значительных величин электронной подвижности, наблюдать целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла, а также реализовать ситуацию с достаточно большим параметром взаимодействия  $r_s \sim 10$  при разумных электронных концентрациях, где энергия Ферми заметно превосходит флуктуации случайного потенциала, действующего на электроны. Тем самым структуры  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$  оказываются уникальными для изучения коррелированных электронных состояний.

Диссертационная работа А.Б. Ванькова нацелена на экспериментальные исследования, в основном методом комбинационного рассеяния света, и численное моделирование эффектов электрон-электронного взаимодействия в гетероструктурах  $\text{MgZnO}/\text{ZnO}$ , в том числе при наличии квантующего внешнего магнитного поля. Развита автором экспериментальная методика оказывается исключительно плодотворной для обнаружения элементарных возбуждений во взаимодействующей системе и исследовании их дисперсии, что позволяет делать выводы о присутствии и проявлениях межчастичных взаимодействий. Экспериментальные результаты подтверждаются численным моделированием, позволяющим проникнуть в область параметров, где аналитическая теория отсутствует. **Все это определяет заметную актуальность темы диссертации А.Б. Ванькова.**

**Анализ содержания диссертации, новизна и достоверность полученных результатов.** Диссертационная работа нацелена на изучение многочастичных эффектов и коллективных возбуждений в сильнодействующих двумерных электронных системах в квантующих магнитных полях.



Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка сокращений, списка публикаций соискателя и списка использованной литературы.

*Введение* содержит краткую мотивацию исследований, цели и задачи научной работы, обоснование их актуальности. Во введении приведены основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, описана апробация результатов.

*Первая глава* диссертации содержит обзор литературы. Он достаточно подробен и написан в педагогическом ключе. Его текст вполне мог бы войти в учебные пособия по физике двумерных взаимодействующих электронов. Также из приведенного обзора становится понятна необходимость постановки ряда задач, решаемых далее в диссертации.

*Вторая и третья главы* диссертационной работы носят методический характер. В них изложены, соответственно, экспериментальная методика (гл. 2) и методы численного расчета (гл. 3). Эти главы весьма полезны для дальнейшего понимания результатов, они поясняют оправданность выбора тех или иных методик, используемых в исследовании.

Дальнейшие главы содержат новые и оригинальные научные результаты.

*Глава 4* содержит результаты исследования магнитоплазменных и межподзонных возбуждений в двумерном электронном газе на основе гетероструктуры MgZnO/ZnO. На основе выполненных экспериментов автор создает достаточно полную картину элементарных возбуждений в такой системе. На мой взгляд, тут наиболее ярким результатом является наблюдение существенной перенормировки циклотронной массы с изменением концентрации электронов. Обнаруженное нарушение теоремы Кона справедливо интерпретируется как совместный эффект непараболичности спектра и межэлектронных взаимодействий.

В *пятой главе* диссертации исследуются коллективные возбуждения, в том числе спин-флип экситоны, в двумерном электронном газе в MgZnO/ZnO в квантующем магнитном поле при факторе заполнения  $\nu = 1$ . Это простейший случай «квантово-холловского ферромагнетика», но, как известно, даже в этой ситуации межчастичные взаимодействия играют ключевую роль. Такая ситуация широко исследовалась, например, в структурах на основе GaAs/AlGaAs, однако в изучаемых материальных системах автор смог найти ряд ярких и новых особенностей коррелированного состояния электронов. В частности, методом комбинационного рассеяния света была исследована дисперсия спин-флип экситона, и обнаружено, что спиновая жесткость (обратная эффективная масса) существенно отличается от теоретических предсказаний. На основе выполненного численного моделирования путем прямой диагонализации многоэлектронного гамильтониана автору удалось получить дисперсию, близкую к измеренной. Результаты дальнейших измерений, в том числе при  $\nu \neq 1$ , приведенные в этой главе, позволяют проанализировать спиновую деполяризацию электронов.

Экспериментальные результаты, приведенные в *шестой главе*, служат своего рода обобщением и развитием результатов, описанных выше. На целочисленных факторах заполнения  $\nu > 1$  автор прослеживает переходы из ферромагнитной в парамагнитную фазу двумерных электронов в наклонном поле, когда энергии соседних уровней Ландау с противоположными компонентами электронного спина оказываются близки. Приведены убедительные доказательства ключевой роли электрон-электронного взаимодействия в таких переходах, делается вывод о возможности существования доменов, выполнена экспериментальная оценка температуры Кюри.



После детального исследования природы основного состояния электронного газа в магнитном поле естественным образом возникает вопрос об элементарных возбуждениях такой системы. Исследованию спиновых возбуждений в режиме квантового эффекта Холла в важном частном случае  $\nu = 2$  посвящена *глава 7* диссертационной работы. И в этом случае метод комбинационного рассеяния света оказывается весьма удобным. Автору удалось наблюдать аномальную дисперсию спиновых экситонов и сопоставить результаты с численным расчетом. Продемонстрирована возможность макроскопического накопления спиновых экситонов в условиях оптического возбуждения, что открывает, в принципе, пути к исследованию коллективных эффектов в системе спиновых возбуждений.

Наконец, в восьмой главе диссертации приводятся результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования коррелированных электронных фаз при промежуточных факторах заполнения  $1 < \nu < 3/2$ . Обнаружена новая спиновая мода (помимо спинового экситона). На основе этого наблюдения делается вывод о нарушении спин-вращательной симметрии в системе. Основываясь на аналогии с другими материальными системами, автор приводит аргументы в пользу возникновения спиновых текстур в таких условиях. Дополнительные свидетельства в пользу такой интерпретации основаны на численном моделировании. Однако, как справедливо отмечается в диссертации, в данном случае, в отличие от ситуации, когда зеемановское расщепление пренебрежимо мало, говорить о скирмионах в узком смысле слова невозможно. Тем не менее, приведенные экспериментальные данные убедительно демонстрируют богатство и нетривиальность новых спиновых фаз, обнаруженных автором.

Сказанное выше **подтверждает новизну результатов**, полученных в диссертационной работе.

**Достоверность основных полученных результатов и выводов** не вызывает сомнений. Автор использует широкий диапазон современных экспериментальных методик, причем оригинальные методы экспериментов в достаточной мере апробированы. Во многих случаях выполнено сравнение результатов экспериментов с работами других авторов, теоретическими предсказаниями и компьютерным моделированием. В пользу высокой достоверности результатов свидетельствует их внутренняя непротиворечивость, а также апробация результатов диссертации на научных семинарах и конференциях.

**Научная и практическая значимость** работы также несомненна. Автором проведено глубокое, подробное и всестороннее экспериментальное исследование коррелированных электронных состояний в достаточно новом полупроводниковом объекте. Полученные результаты вносят значительный вклад в физику квантового эффекта Холла.

При чтении и обсуждении диссертации возникают следующие **замечания**:

1. На мой взгляд, часть исследования, связанная с компьютерным моделированием, выиграла бы от более подробного сопоставления с результатами предшественников. Представленная методика расчета сложная, причем отбор базисных состояний в определенной степени основан на физической интуиции. Хотя в тексте диссертации есть указания на то, что те или иные расчеты автора совпадают с известными в литературе, количественное сопоставление для ряда



известных случаев было бы очень полезным и позволило бы оценить ограничения и погрешности расчетов. Подчеркну, что это особенно важно для интерпретации результатов главы 8, где численный расчет показывает нетривиальное поведение энергий разных состояний в зависимости от фактора заполнения и концентрации.

2. Хотя у меня отсутствуют сомнения в правильности интерпретации зависимости циклотронной массы (и частоты) от концентрации электронов как совместного эффекта непараболичности спектра и межчастичных взаимодействий, конкретный механизм эффекта остается неясным. В частности, помогло бы исследование температурной зависимости  $m^*/m_0$ , так как в пределе  $T \rightarrow 0$ ,  $\hbar\omega_c \ll E_F$  (фактор заполнения  $\nu \gg 1$ ) в рамках теории Ландау непараболический характер одночастичного (затравочного) спектра не должен сказаться на виде перенормировок, а теорема Кона по-прежнему должна работать.
3. Приведенные в главе 8 аргументы в пользу формирования спиновой текстуры основаны на появлении дополнительной ветви в спектре элементарных возбуждений и аналогии с тем, что ожидается для скирмионов в случае нулевого зеемановского расщепления. Возникает вопрос, можно ли спиновую текстуру визуализировать в тех же экспериментах по рассеянию света (например, по появлению дифрагированных на текстуре пучков) или какими-либо другими методами?
4. Имеются стилистические замечания. Вот несколько примеров:
  - На мой взгляд, в главах 2 и 3 несколько нарушен баланс между описанием экспериментальных методик (их можно было бы изложить чуть подробнее) и компьютерного моделирования.
  - В разделе 1.3 ссылка на рис. 1.4 предшествует ссылке на рис. 1.3.
  - Имеются опечатки: в русскоязычной литературе фамилия Зейтц пишется через «ц», прилагательное «вигнеровский» со строчной буквы, и т.п.

Перечисленные замечания носят в заметной степени формальный характер, они подчеркивают масштабность экспериментальных исследований и демонстрируют, что работы автора обладают широкой перспективой для дальнейшего развития. Они не умаляют общей высокой оценки диссертационной работы А.Б. Ванькова.

Диссертация Александра Борисовича Ванькова является завершенной научной работой, выполненной на высоком научном уровне. В ней получен широкий спектр новых, актуальных и важных научных результатов, подчеркивающих важность межчастичных корреляций в двумерных электронных структурах и позволяющих количественно охарактеризовать новые коллективные фазы, возникающие в таких системах. Основные научные результаты диссертации опубликованы в авторитетных физических журналах (Nature Communications, Physical Review B, Applied Physics Letters, Письма в ЖЭТФ), докладывались автором на тематических конференциях и семинарах. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация «Оптическая спектроскопия сильнокоррелированных двумерных электронных систем в квантующем магнитном поле» Ванькова А. Б. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния и отвечает требованиям п.п. 2, 4, 5, 9, 11 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 №842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Ваньков Александр Борисович, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников,  
член-корреспондент РАН,  
ведущий научный сотрудник  
Сектора теории квантовых когерентных явлений в твердом теле  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН,  
Адрес места работы:  
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26  
Контактные данные:  
Тел.: + 7 911 913 04 36  
E-mail: glazov@coherent.ioffe.ru



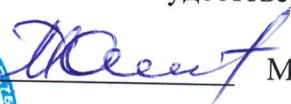
Глазов Михаил Михайлович  
«2» октября 2023 г.



Согласен на обработку персональных данных.  
Глазов Михаил Михайлович  
«2» октября 2023 г.

Подпись Глазова Михаила Михайловича удостоверяю,  
Ученый секретарь

к. ф.-м.н.



М.И. Патров