

Отзыв о диссертационной работе Григорьева Павла Дмитриевича «Особенности магнитосопротивления в слоистых квазидвумерных проводниках», представленную им к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа П.Д. Григорьева посвящена одной из актуальных проблем физики конденсированного состояния – исследованию электронных явлений в низкоразмерных структурах органического происхождения в нормальном и сверхпроводящем состояниях.

Интерес к низкоразмерным проводникам был стимулирован статьей Литтла (1964), в которой он предсказывал возможность перехода в сверхпроводящее состояние при комнатных температурах одномерных молекулярных полимеров. К 1981 году было синтезировано более 400 органических квазидвумерных (Q1D) проводников, из них лишь небольшое число переходило в сверхпроводящее состояние при температуре T_c , меньших или порядка одного градуса Кельвина. Более перспективными в этом направлении оказались слоистые органические комплексы с переносом заряда с квазидвумерным (Q2D) электронным энергетическим спектром. Первый квазидвумерный органический сверхпроводник β -(BEDT-TTF)₂J₃ был получен в 1984 году в Черногловке. При атмосферном давлении температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c равнялась 1,5K, а под действием внешнего давления порядка 1кбар температура перехода T_c повышалась до 8K. Оказалось, что многие комплексы с переносом заряда (BEDT-TTF)₂X на основе тетрагидрофульвалена (TTF) с различными анионами X обладают ярко выраженным металлическим типом проводимости. Их электросопротивление убывало с понижением температуры и обращалось в нуль при существенно различных температурах T_c для различных кристаллографических модификаций. Так, например, при атмосферном давлении проводник κ -(BEDT-TTF)₂J₃ переходил в сверхпроводящее состояние при $T_c = 3,6$ K. Наибольшая температура перехода T_c , равная 14,2 K, пока наблюдалась в органическом комплексе β' -(BEDT-TTF)₂ICl₂. Таким образом идея Литтла не получила экспериментального подтверждения.

Низкоразмерные проводники органического происхождения всё же весьма привлекательны для исследователей благодаря своим уникальным свойствам – чувствительной реакцией на слабые структурные изменения и большим числом фазовых превращений при сравнительно небольшом внешнем воздействии на систему носителей заряда. Поэтому и по сей день огромен интерес к изучению физических явлений в органических проводниках, в основном слоистых с квазидвумерным электронным энергетическим спектром.

Совершенствование технологии приготовления образцов квазидвумерных проводников позволило в лаборатории Щеголева обнаружить осцилляции Шубникова – де Газа межслоевого сопротивления органического проводника β -(BEDT-TTF)₂JBr₂. При этом с изменением угла ϑ между вектором магнитного поля и нормалью к слоям наблюдались острые максимумы сопротивления, периодически повторяющиеся как функция $\tan \vartheta$ (Письма в ЖЭТФ, 1988, т.47, с.302-306; т.48, с.498-501)

Осцилляции намагниченности металлов в квантующем магнитном поле, предсказанные Ландау в 1930 году и обнаруженные в Лейдене де Гаазом – ван Альфеном, были успешно использованы в качестве надежного спектроскопического метода восстановления поверхности Ферми с помощью экспериментального исследования эффекта де Гааза – ван Альфена при низких температурах, когда в температурном размытии фермиевской функции распределения носителей заряда помещается всего лишь несколько квантованных уровней их энергии. Теория эффекта де Гааза – ван Альфена в металлах с произвольным законом дисперсии носителей заряда была построена Лифшицем и Косевичем в 1954 году (ДАН СССР, 1954). Ими же было показано, что не только намагниченность, но и все

термодинамические и кинетические характеристики металлов испытывают осцилляционную зависимость от обратной величины сильного магнитного поля при весьма низких температурах, в основном при температурах жидкого гелия. Таким образом было создано новое направление в электронной теории металлов восстановления поверхности Ферми с помощью экспериментального измерения термодинамических и кинетических характеристик вырожденных проводников в сильном магнитном поле, названного в последствии фермиологией.

Неожиданным оказалось обнаружение в 1973 году Богодом и Красовицким в Физико-техническом институте низких температур квантовых осцилляций магнитосопротивления висмута при температуре 77 градусов Кельвина. При этом такие осцилляции не наблюдались в исследованиях намагниченности висмута, так что природа этих квантовых осцилляционных эффектов существенно различна, хотя основной причиной эффекта де Газа – ван Альфена и Шубникова – де Газа является наличие особенности плотности состояний электронов проводимости на уровне Ферми в квантующем магнитном поле, которые периодически повторяются с изменением величины поля. На это обратили внимание еще в 1940 году Б.И. Давыдов и И.Я.Померанчук в статье, опубликованной в физическом журнале (J.Phys.USSR 1940, v.2, p.147), в которой было показано, что амплитуда рассеяния испытывает особенности в квантующем магнитном поле, что приводит к осцилляциям времени свободного пробега носителей заряда. Таким образом теорию квантовых осцилляционных эффектов следует строить комплексно особенно в проводниках с несколькими группами носителей заряда. После классических работ Эдвардса, Бычкова, Кубо построение теории квантовых осцилляционных эффектов в металлах в сильном магнитном поле оказалась полностью завершенной. Понять причину высокотемпературных осцилляций не трудно, если обратиться к работе В.Л.Гуревича, опубликованной в Письмах в ЖЭТФ, том 5, сс.260-262 (1967), в которой он рассмотрел квантовые осцилляции сопротивления проводника с несколькими группами носителей, и показал, что при любой статистике происходит перепутывание частот осцилляций. Не трудно понять, что с ростом температуры более медленно затухают осцилляции с суммарной частотой, если за эти осцилляции ответственны носители заряда различного электрон-дырочного типа, т.е.различного знака циклотронной эффективной массы. Если комбинированная частота осцилляции обязана носителям заряда одного типа, то более медленно затухают с ростом температуры осцилляции с разностной частотой. Группа экспериментаторов Богода и Красовицкого с со своими сотрудниками активно занимались исследованием низкотемпературных осцилляций магнитосопротивления висмута и сплавов висмута с сурьмой различного состава. Последняя их публикация этих работ в журнале ФНТ в 1991 году (т.17, с.718), где приведены измерения сопротивления в магнитном поле до 20 тесла, причем высокотемпературные осцилляции наблюдались до 12 тесла. На протяжении 10 лет после обнаружения этого интересного эффекта теоретики равнодушно относились к нему, и лишь преподаватель физики Запорожского индустриального института В.М.Поляновский решил предложить интерпретацию высокотемпературных осцилляций и объяснить, почему эти осцилляции наиболее ярко проявляются в висмуте в магнитном поле, направленном вдоль тригональной оси и при отклонении от таковой начинают угасать (Письма в ЖЭТФ, т.46,с.108-110 1987). Затем последовала целая серия статей Поляновского, в которых он занимался детальным исследованием высокотемпературных осцилляций в полуметаллах и слоистых проводниках (Phys.Rev.B, v.47, p.1985, 1993), а также им предсказаны высокотемпературные магнито-размерные осцилляции в тонких пленках.

Сформулированная И.М.Лифшицем и его сотрудниками обратная задача восстановление электронного энергетического спектра металлов с помощью экспериментального исследования различных явлений в сильном магнитном поле может быть использована и в слоистых квазидвумерных проводниках, если интеграл перекрытия волновых функций электронов, принадлежащих соседним слоям, t_z значительно больше расстояния между квантованными уровнями энергии электронов проводимости $\hbar\omega_c$. Однако для реализации заданной программы потребуются огромный труд. Этому посвящены вторая и третья главы диссертации, в которых изложены результаты исследования Григорьевым квантовых осцилляционных эффектов и ориентационного эффекта в органических проводниках совместно с

экспериментаторами Его участие отражено в 12 статьях, опубликованных в престижных журналах, а его личный вклад достаточно весомый. Им получены аналитические формулы для угловой зависимости магнитосопротивления, удобные для извлечения параметров электронной дисперсии из экспериментальных данных, и проведено сопоставление с экспериментом. Предложена модель некогерентного канала межслоевой проводимости, объясняющая необычную угловую и температурную зависимость магнитосопротивления квазидвумерных металлов.

Использование Григорьевым надежных и достаточно апробированных методов исследования квантовых осцилляционных эффектов в металлах позволяет признать достоверность полученных им результатов.

С увеличением магнитного поля, когда t_z сравнимо или меньше $\hbar\omega_c$, уже нельзя пренебрегать плавной зависимостью амплитуды рассеяния от $\hbar\omega_c$ и необходимо выйти за рамки квазиклассического описания. Этому важному вопросу посвящена первая глава диссертации. Автор рассмотрел всевозможные случаи с различными соотношениями между t_z , $\hbar\omega_c$ и шириной квантованного уровня, включая и случай сколь угодно малой величины t_z . Им получены новые зависимости сопротивления слоистого проводника от величины магнитного поля. Переход от Q2D проводника к двумерному со своим сложным дробным квантовым эффектом Холла сопряжен с огромными трудностями, и любая попытка хоть как-то приблизиться к двумерии представляет несомненный интерес и достойна внимания.

Несомненно интересны также новые теоретические результаты Григорьева, изложенные и в последних двух главах.

В 4-й главе анализируются различные варианты возникновения волн зарядовой плотности в низкоразмерных проводниках. В рамках теории самосогласованного поля описаны волны зарядовой плотности в магнитном поле, получены условия устойчивости фазы с одним смещенным волновым вектором и фазы с двумя волновыми векторами.

Автору удалось объяснить необычное поведение тяжелофермионного соединения $CeIn_3$ при разрушении антиферромагнитного упорядочения магнитным полем, при котором наблюдалось резкое увеличение циклотронной эффективной массы. Обычно эффективная масса становится весьма тяжелой на орбитах в магнитном поле, близких к самопересекающейся. Детальный анализ осцилляций де Гааза – ван Альфена показал, что в этом соединении следует ожидать близость к фазовому топологическому переходу Лифшица, когда возможно сближение отдельных полостей поверхности Ферми и все термодинамические и кинетические характеристики проводника испытывают магнитопробные квантовые осцилляции с большой амплитудой.

Автором рассмотрен широкий круг вопросов сверхпроводимости квазиодномерных органических проводников в условиях возникновения волн зарядовой и спиновой плотности. Построена фазовая диаграмма в сильном магнитном поле. Предсказано спонтанное нарушение дискретной симметрии по направлению спина в высокополевой волне зарядовой плотности со смещенным вектором нестинга, что приводит к появлению спинового тока при прохождении потока зарядов. Показано, что переход в состояние со смещенным вектором нестинга сопровождается скачком энергетической щели. Исследована возможность микроскопического сосуществования волны спиновой плотности (ВСП) и сверхпроводимости в квазиодномерных металлах. Показано, что такая сверхпроводимость, возникающая на фоне ВСП, имеет ряд качественных особенностей, и оказывается более выгодным триплетное сверхпроводящее спаривание. Это подтверждается имеющимися экспериментальными данными по верхнему критическому полю.

Опубликованные в более 40 статьях результаты его теоретических исследований электронных явлений в низкоразмерных проводниках – одной из актуальных в настоящее время области физики твердого тела представляют несомненный интерес.

Диссертационная работа Григорьева, в которой вынесено на защиту 22 статьи с оригинальными научными результатами автора, написана русским языком с небольшим вкраплением американских терминов типа crossover и др. Она содержит библиографию, насчитывающую 352 наименования. Как обычно при желании всегда можно найти несущественные погрешности в работе.

Неудачен способ определения поперечного сечения поверхности Ферми по измерениям сопротивления току поперек слоев, изложенный в 3-й главе. Более надежно определение диаметра сечения поверхности Ферми по периодам осцилляций межслоевого сопротивления с изменением угла θ между вектором магнитного поля и нормалью к слоям при различных азимутальных углах φ .

В вводной части диссертации даже с ссылкой на известные монографии Абрикосова и И.Лифшица утверждается автором будто отсутствует продольное магнитопротивление при постоянном времени свободного пробега электронов. Как правило, продольное сопротивление вырожденных проводников растет с увеличением магнитного поля, достигая насыщения в классически сильных магнитных полях. Вероятно это утверждение автора является следствием недоразумения и его следует отнести к опискам, которых в диссертации не мало.

Нет оснований сомневаться в достоверности представленных автором результатов, поскольку они получены с использованием надежных и достаточно апробированных методов теоретической физики, хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований рассмотренной в диссертации проблемы.

П.Д. Григорьев – молодой теоретик, фанатически увлеченный физикой. Он активно участвует во многих международных совещаниях в качестве приглашенного докладчика, что свидетельствует о том, что его результаты исследования актуальных проблем физики конденсированного состояния важны и представляют несомненный интерес научной общественности.

Диссертационная работа Д.П.Григорьева содержит существенно новые результаты теоретического исследования электронных явлений в низкоразмерных проводниках, а их совокупность вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям по специальности «теоретическая физика».

Автор диссертационной работы Павел Дмитриевич Григорьев вполне достоин присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук.

Афтореферат правильно передает содержание диссертации.

Главный научный сотрудник Физико-технического института низких температур
им. Б.И.Веркина Национальной академии наук Украины
(Украина, Харьков - 61103, проспект Ленина, 47, тел.+38-057-345-04-93)
Доктор физико-математических наук, профессор

В.Г. Песчанский

Подпись профессора В.Г.Песчанского утверждаю
Ученый секретарь ФТИНТ НАН Украины
Кандидат физико-математических наук



А.М. Калиненко