

**Отзыв официального оппонента Бразовского Сергея Александровича  
на диссертацию Григорьева Павла Дмитриевича  
«Особенности магнетосопротивления в слоистых квазидвумерных проводниках»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 -теоретическая физика**

Диссертационная работа Григорьева Павла Дмитриевича посвящена теории квазидвумерных проводников в магнитном поле. Эта тема важна сегодня, поскольку большинство активно изучаемых в настоящее время проводящих материалов обладают слоистой архитектурой, приводящей к высокой анизотропии. Сюда относятся все высокотемпературные сверхпроводники, наиболее исследованные органические проводники, самые популярные сейчас халкогениды переходных металлов, графит, гетероструктуры и т.д.

Магнитное поле традиционно является мощным инструментом определения электронной структуры различных металлов, в первую очередь это относится к магнитным осцилляциям, теоретическое и экспериментальное изучение которых составило золотую эпоху физики в СССР. Открытие органических проводников в 1980'х годах обнаружило целый фейерверк магнито-осцилляционных явлений. Особенно стимулирующим было открытие здесь, в Черноголовке, коллективом И.Ф. Щеголева и Э.Е. Ягубского, слоистых органических сверхпроводников. Здесь же на этих соединениях был открыт и новый тип магнитных осцилляций, к которым затем присоединились новые типы. Их исследование производится во многих странах мира, особенно экстенсивно в Японии. Настоящей провокацией явилось недавнее открытие магнитных квантовых осцилляций в высокотемпературных сверхпроводниках - ВТСП - подтвердившее существование малых электронных карманов и, через это, основополагающую роль неполного нестинга сверхструктуры магнитного или зарядового упорядочения (ЗУ). Совсем новое - последних двух лет, возбуждение в мире ВТСП вызвано обнаружением ЗУ и волн зарядовой плотности – ВЗП, в сосуществовании с которыми развивается сверхпроводимость. Эти и другие события поставили ряд важных задач для теории, среди них многие оставались без внимания. Их постановке и решению посвящены работы составившие содержание диссертации П.Д. Григорьева.

Несмотря на то, что теоретические исследования проводились на протяжении нескольких десятилетий, до сих пор оставалось много открытых вопросов. Например, отсутствовала теория магнетосопротивления в сильно анизотропных слоистых металлах в режиме сильного магнитного поля, когда расстояние между уровнями Ландау сравнимо с или даже больше чем межслоевые интегралы перескока. В этом режиме традиционная теория не описывает многие качественные зависимости и особенности, наблюдаемые в экспериментах. В диссертации сделаны важные шаги в построении такой теории. В частности, вычислена межслоевая проводимость для когерентного межслоевого переноса электронов в сильном магнитном поле в различных предельных случаях, определяемых отношениями трех параметров: расстоянием между уровнями Ландау, межслоевым интегралом перескока и уширением уровней из-за рассеяния на примесях. Результаты этих вычислений впервые объяснили и дали теоретическое описание ряда качественных эффектов, наблюдаемых в слоистых проводниках. Также до сих пор имеются многие открытые вопросы о влиянии волн зарядовой или спиновой плотности на электронные свойства в магнитном поле и на сверхпроводимость. В диссертации, в рамках приближения среднего поля для волны плотности, исследованы некоторые из этих вопросов и объяснены многие интересные эффекты. Результаты диссертации развивают теоретическое описание многих важных эффектов,

активно применяющихся для определения электронной структуры различных квазидвумерных проводников. Поэтому диссертационная работа Григорьева Павла Дмитриевича является востребованной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и списка публикаций и списка литературы. Диссертация имеет объем 290 страниц; она содержит 59 рисунков, встроенных в текст, и 352 пункта цитированной литературы.

В общем **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, аргументирована научная новизна исследования и указаны его основные цели, сформулированы основные результаты работы.

В **первой главе** диссертации вычислена монотонная часть продольного межслоевого магнетосопротивления в различных предельных случаях, определяемые отношениями трех параметров: расстоянием между уровнями Ландау, межслоевым интегралом перескока и уширением уровней из-за рассеяния на точечных примесях. Согласно стандартной теории в рамках  $\tau$ -приближения, продольное магнетосопротивление отсутствует. Но для слоистых проводников в сильном магнитном поле  $\tau$ -приближение с постоянным временем рассеяния не применимо; возникает сильное продольное межслоевое магнетосопротивление, что было впервые предложено и вычислено диссертантом в рамках когерентного межслоевого переноса. В пределе сильного магнитного поля показано, что магнетосопротивление описывается корневой зависимостью. Экспериментальные данные подтверждают эту зависимость, для которой ранее не было даже качественного объяснения. Предыдущие расчеты угловых и квантовых осцилляций магнетосопротивления в слоистых металлах с помощью диаграммной техники Фейнмана не давали этого эффекта, поскольку использовали вычисленную в простом борновском приближении (или вообще не зависящую от энергии и магнитного поля) собственно-энергетическую часть электронной функции Грина.

**Вторая глава** диссертации посвящена теории магнитных квантовых осцилляций (МКО) магнетосопротивления в слоистых металлах, которая в отличие от традиционных и более ранних исследований учитывает, что интеграл межслоевого перескока электронов может быть сравним с расстоянием между уровнями Ландау. В диссертации предложены и исследованы новые качественные эффекты в сильно анизотропных квазидвумерных металлах, а именно, предсказаны медленные осцилляции магнетосопротивления и сдвиг фазы осцилляций квантовых осцилляций. В отличие от быстрых квантовых осцилляций, медленные осцилляции возникают не из-за дополнительных малых карманов поверхности Ферми, а из-за ее гофрировки. Поэтому частота медленных осцилляций магнетосопротивления имеет немонотонную угловую зависимость, а температурное затухание амплитуды медленных осцилляций определяется не температурным размытием функции распределения Ферми, как у квантовых осцилляций, а только зависящими от температуры механизмами рассеяния электронов. Поэтому медленные осцилляции заметны при существенно более высоких температурах, чем квантовые осцилляции, и удобны для экспериментальных наблюдений. Частота медленных осцилляций позволяет извлечь из эксперимента важный параметр зонной структуры электронов - величину интеграла межслоевого перескока. Угловая зависимость частоты медленных осцилляций позволяет определить импульс Ферми электронов в проводящей плоскости.

Третья глава диссертации посвящена теории угловых осцилляций магнетосопротивления. В разделе 3.2 в рамках стандартной теории магнетосопротивления исследована область применимости широко используемых более ранних результатов и выведены новые полезные формулы. В разделе 3.3 изучаются отклонения от стандартной теории угловой зависимости магнетосопротивления. Например, исследуется влияние продольного межслоевого магнетосопротивления, предсказанного в первой главе диссертации. Также изучено проявление в угловой зависимости магнетосопротивления не зонного (или "некогерентного") механизма межслоевой проводимости по локальным кристаллическим дефектам, например, по резонансным примесям.

Четвертая глава диссертации посвящена влиянию волн зарядовой или спиновой плотности на электронную проводимость и магнетосопротивление. В разделе 4.2 с помощью разложения Гинзбурга-Ландау исследована структура параметра порядка и фазовая диаграмма волны зарядовой плотности вблизи температуры перехода в сильном магнитном поле. Показано, что в основной области фазовой диаграммы имеется синусоидальная, с узлами, а не с постоянной амплитудой, модуляция параметра порядка, соответствующая биениям ВЗП с двумя волновыми векторами. В разделе 4.3 обсуждается возможность, микроскопическая структура и фазовая диаграмма неоднородной волны зарядовой или спиновой плотности при неидеальном нестинге (так называемой, солитонной фазы) для нескольких типов закона дисперсии электронов. В разделе 4.4 исследован скачок анизотропии проводимости при переходе в состояние с волной плотности для различных структур параметра порядка этой волны плотности. В разделе 4.5 предложены некоторые качественные эффекты, к которым может приводить перестройка поверхности Ферми, вызванная рассеянием на периодическом потенциале волны плотности.

Пятая глава посвящена сверхпроводимости в состоянии с волной зарядовой или спиновой плотности. Исследовано, как меняются температура перехода и верхнее критическое поле  $H_{c2}$  сверхпроводимости на фоне волны плотности. В частности, показано, что волна плотности не обязательно экспоненциально уменьшает температуру сверхпроводящего перехода, как это следовало бы из наивных рассуждений, учитывающих только образование щели волны плотности без учета ее влияния на закон дисперсии квазичастиц. Иногда напротив, волна плотности может повысить температуру сверхпроводящего перехода, что и наблюдается в нескольких органических металлах, где изменением внешнего давления можно подавить волну плотности. В диссертации также показано, что верхнее критическое поле сверхпроводимости на фоне волны плотности может возрасти в несколько раз, даже если температура сверхпроводящего перехода на фоне волны плотности падает. Этот эффект также связан с изменением закона дисперсии электронов на фоне волны плотности, которая в диссертации учитывается в рамках приближения среднего поля, но с учетом ее микроскопической структуры при неидеальном нестинге поверхности Ферми. Также изучается взаимодействие спиновой структуры параметров порядка сверхпроводимости и волны спиновой плотности. Показано, что если куперовское спаривание возникает из-за независимого от спина (зарядового) электрон-электронного взаимодействия, то волна спиновой плотности подавляет спин-синглетную сверхпроводимость и почти не подавляет спин-триплетную.

В приложения диссертации вынесено изложение некоторых вспомогательных вопросов. Диссертация также содержит заключение, список публикаций, который включает 22 публикации в международных высокорейтинговых журналах, и список литературы.

**Достоверность** выводов диссертации обоснована надежностью применявшихся методов расчета и реалистичностью используемых теоретических моделей, использованием нескольких взаимно дополняющих методов расчета, а также согласием с данными физических экспериментов и других более поздних теоретических исследований.

Важная положительная черта диссертации П.Д. Григорьева заключается в оригинальных постановках задач, их адекватной реализации и в детальном сравнении полученных теоретических результатов с экспериментом, которое показало их применимость и пользу для описания электронной структуры реальных соединений. Полученные результаты являются достаточно общими и имеют отношение ко многим слоистым проводникам, среди которых различные целые классы, как то: органические металлы, природный и интеркалированный графит, многие соединения переходных металлов и ряд тяжелофермионных соединений, высокотемпературные сверхпроводники, гетероструктуры.

Работа содержит ряд результатов, представляющих значительный интерес для понимания и описания особенностей магнетосопротивления в слоистых квазидвумерных металлах, а также электронных свойств состояний с волной зарядовой или спиновой плотности. Автор впервые построил и развил теорию межслоевого магнетосопротивления в сильно анизотропных квазидвумерных металлах, когда уже не применима стандартная трехмерная теория магнетосопротивления, предполагающая малость квантования Ландау по отношению к межслоевому интегралу перескока. В диссертации впервые дано теоретическое объяснение многим достаточно общим качественным эффектам, важным для понимания и изучения электронных свойств слоистых проводников.

Результаты диссертации уже используются научными коллективами, занимающимися определением электронных свойств сильно анизотропных слоистых проводников (например, органических металлов) по данным о полевой и угловой зависимости магнетосопротивления. Это в целом подчеркивает **значимость** результатов диссертации **для науки и практики**.

По самой диссертации можно сделать следующие замечания, однако, ни сколько не умаляющие ее значение.

1. Содержание диссертации шире, чем ее название, что в общем то положительно. Название и текст грешат тавтологией «слоистых квазидвумерных».
2. Стоило бы уделить больше места качественному объяснению новых неожиданных результатов, таких как медленные осцилляции и корневая зависимость от магнитного поля.
3. Успех работы в значительной степени определялся преодолением штампов: осознанием неприменимости в новых условиях традиционных подходов. Однако приближения, используемые в работах автора, как например отбор основных диаграмм в процессах рассеяния, также имеют ограниченную область применимости, и этот аспект недостаточно проанализирован.
4. Динамика и кинетика межслоевых токов не может быть полностью независимой от рассеяний в плоскости, хотя бы из-за модификации плотности состояний – весьма специфической при выраженном квантовании Ландау. Более того, может возникнуть дополнительная структура осцилляций из-за специфических эффектов (де)локализации при заполнении очередного уровня Ландау. Здесь мы упираемся в очень сложные и еще не разрешенные вопросы целочисленного эффекта Холла в многослойных системах с дефектами, которые требуют отдельного исследования, что стоит пожелать автору.

Диссертация представляет собой законченный труд, отражающий высокую квалификацию соискателя в области теоретической физики твердого тела. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Новые научные результаты, полученные автором диссертации, являются **актуальными** и имеют существенное значение для исследования электронных свойств сильно анизотропных проводников. Основные положения и выводы диссертации являются **новыми, обоснованными и достоверными**. Работа отвечает требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, а П.Д. Григорьев заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 -теоретическая физика.

заслуженный сотрудник лаборатории теоретической  
физики и статистических моделей (LPTMS)  
Национального научно-исследовательского центра  
Франции (CNRS) и университета южного Парижа,  
доктор физико-математических наук  
Сергей Александрович Бразовский

Почтовый адрес:  
Serguei Brazovskii,  
LPTMS, CNRS & Université Paris Sud,  
Bâtiment 100,  
91405 Orsay CEDEX, FRANCE

E-mail: [serguei.brazovski@lptms.u-psud.fr](mailto:serguei.brazovski@lptms.u-psud.fr)  
Телефон: (+33) 1 69156874  
Web-page: <http://lptms.u-psud.fr/membres/brazov/>

*ВЗР* 10.06.15

*Сергей Бразовский С.А. заверяю,  
секретарь Ученого совета ИТФ им. П.Д. Ландау РАН  
(С.А. Крашак)*

