

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Григорьева Павла Дмитриевича «Особенности магнитосопротивления в слоистых квазидвумерных проводниках», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 -теоретическая физика

Актуальность и важность нового направления разработанного в диссертационной работе Григорьева Павла Дмитриевича и в его публикациях по теме диссертации не вызывают сомнений и состоят, на мой взгляд, в следующем. В последние десятилетия развитие измерительной инструментальной базы физики конденсированных сред привело к взрывообразному появлению новых данных отражающих квантовую природу материи. С другой стороны, фокус исследований сместился в область сильно коррелированных электронных систем, таких, например, как высокотемпературные сверхпроводящие купраты, пниктиды и халькогениды, органические металлы и гетероструктуры, характеризующиеся существенной квазидвумерностью кристаллического строения и связанной с этим анизотропией электронных свойств. Доступность относительно высоких магнитных полей (порядка 100 Тл) в комбинации с получением образцов сильно анизотропных квазидвумерных слоистых проводников, сделали доступным для исследований ранее не изученный домен физических явлений в материалах помещенных в сильное магнитное поле. В результате, надежная теория магнитосопротивления в слоистых квазидвумерных проводниках, когда отношение расстояния между уровнями Ландау $\hbar\omega_c$ к межслоевому интегралу перескока t_z не мало, стала насущной необходимостью, и именно ей посвящена большая часть диссертации П.Д. Григорьева, важная для продолжения и развития этого направления исследований конденсированных сред.

Измерения магнитосопротивления традиционно используются для определения электронной структуры металлов. В последние 10 лет изучение электронной структуры высокотемпературных сверхпроводников с помощью магнитных квантовых осцилляций и угловой зависимости магнитосопротивления существенно обогатило и углубило наше понимание этих важных соединений, поскольку позволило получить новые важные данные в объеме образцов, недоступные методике ARPES. Классическая теория магнитосопротивления в металлах построена уже около полвека назад, и казалось, что ничего качественно нового в этой области уже нельзя найти. В те времена доступные магнитные поля были намного слабее чем сейчас, а изучаемые металлы были в основном трехмерными или слабо анизотропными. Поэтому стандартная теория магнитосопротивления предполагала малым отношение расстояния между уровнями Ландау, $\hbar\omega_c$, к межслоевому интегралу перескока t_z . Однако, как удалось показать автору, в сильно анизотропных слоистых металлах и в сильном магнитном поле, когда это отношение не мало, появляются новые качественные эффекты. Самым ярким таким эффектом является, наверное, сильный корневой рост с приложенным магнитным полем продольного межслоевого магнитосопротивления, впервые предложенный и подробно

исследованный в первой главе диссертации. В рамках классической теории магнитосопротивления, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана в тау-приближении, этот эффект вообще отсутствует. Другим новым качественным эффектом, важным для экспериментального определения электронной структуры слоистых квазидвумерных проводников, являются так называемые медленные осцилляции магнитосопротивления, впервые предложенные и изученные П.Д. Григорьевым и описанные во второй главе диссертации вместе с другими особенностями магнитных квантовых осцилляций. Результаты исследования угловой зависимости магнитосопротивления (в третьей главе диссертации) также очень важны для экспериментального изучения электронной структуры квазидвумерных проводников. Последние две главы диссертации описывают результаты автора относящиеся к теории состояний ферми-систем с волной зарядовой или спиновой плотности и сверхпроводимости на их фоне. Несмотря на сложность этой задачи, автору диссертации удалось получить ряд важных и интересных результатов. Особенно следует отметить теоретическое предсказание роста (в несколько раз) верхнего критического поля сверхпроводимости на фоне волны плотности, подтвержденное экспериментально.

Таким образом, результаты диссертационной работы безусловно весьма актуальны для изучения электронной структуры различных слоистых квазидвумерных проводников, что является широким, важным и перспективным разделом современной физики твердого тела. Большое количество качественно новых эффектов, впервые полученных и исследованных в диссертации, показывает высокую степень научной новизны диссертационной работы П.Д. Григорьева.

Теоретические расчеты во всех главах диссертации, в частности, исследование фазовой диаграммы волны плотности в магнитном поле (в четвертой главе) и изучение сверхпроводимости на фоне волны плотности (в пятой главе), выполнены на высоком техническом уровне, подчеркивающим очень хорошее владение диссертантом различными методами теоретической физики.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений, списка публикаций и списка литературы. Диссертация имеет объем 290 страниц; текст диссертации содержит 59 рисунков и 352 пункта цитированной литературы. По теме диссертации опубликованы 22 работы в международных журналах с высоким импакт-фактором, которые входят в систему Web of Science и список ВАК.

В общем введении обоснована актуальность проводимого исследования, сформулированы основные результаты диссертационной работы, описано содержание диссертации по главам.

В первой главе диссертации вычислена монотонная часть корневой зависимости от магнитного поля продольного межслоевого магнитосопротивления в различных предельных случаях, определяемых отношениями трех параметров: циклотронным периодом, временем межслоевого перескока и средним временем рассеяния на точечных примесях. Этот результат является неожиданным, важным, качественно новым и достаточно обоснованным. Кроме надежности теоретического вычисления, этот результат подтверждается сравнением с различными экспериментальными данными. Как было замечено ранее, согласно стандартной теории в рамках приближения времени рассеяния

(гау-приближения), продольное магнитосопротивление отсутствует. Автор показал, что в пределе сильного магнитного поля, продольное межслоевое магнитосопротивление описывается корневой зависимостью. В диссертации также найдены асимптотики этой зависимости в других пределах и даже в некоторых промежуточных случаях.

Во второй главе диссертации развита теория магнитных квантовых осцилляций межслоевого магнитосопротивления в сильно анизотропных квазидвумерных слоистых металлах. В отличие от стандартной теории трехмерных изотропных систем, вычисление не предполагает малым отношение расстояния между уровнями Ландау $\hbar\omega_c$ к интегралу межслоевого перескока электронов t_z , что приводит к новым качественным эффектам: медленным осцилляциям магнитосопротивления и сдвигу фазы биений квантовых осцилляций. Природа медленных осцилляций отличается от хорошо известных ранее квантовых осцилляций: медленные осцилляции возникают из-за гофрировки поверхности Ферми, связанной с конечным t_z . Соответственно, имеются качественные различия между квантовыми и медленными осцилляциями магнитосопротивления. Во-первых, частота медленных осцилляций определяется величиной t_z и не связана с площадью каких-либо замкнутых электронных орбит в импульсном пространстве. Поэтому медленные осцилляции очень удобны для экспериментального определения величины t_z интеграла межслоевого перескока электронов. Во-вторых, частота медленных осцилляций имеет немонотонную угловую зависимость, схожую с угловыми осцилляциями межслоевого магнитосопротивления, что позволяет отличить их от квантовых осцилляций и определить из эксперимента импульс Ферми электронов в проводящей плоскости. В-третьих, в отличие от квантовых осцилляций, температурное размытие функции распределения Ферми не влияет на амплитуду медленных осцилляций, которая определяется только зависящими от температуры механизмами рассеяния электронов. Поэтому медленные осцилляции наблюдаются при существенно более высоких температурах, чем квантовые осцилляции, и удобны для экспериментальных наблюдений. Все это позволяет сделать вывод, что предложенные в диссертации медленные осцилляции магнитосопротивления являются важным дополнительным источником информации об электронной структуре квазидвумерных металлов.

В третьей главе диссертации изучаются угловые осцилляции магнитосопротивления в квазидвумерных металлах с анизотропным законом дисперсии в проводящей плоскости. Исследована область применимости предыдущих теоретических результатов, широко используемых для обработки экспериментальных данных. Показано, что область их применимости значительно уже предполагавшейся ранее, что приводит к неправильному определению параметров электронной структуры во многих соединениях. Получены новые полезные формулы для угловой зависимости магнитосопротивления. Также изучены отклонения от стандартной теории угловой зависимости магнитосопротивления, возникающие из-за влияния продольного межслоевого магнитосопротивления, предсказанного в первой главе диссертации, или из-за дополнительных "некогерентных" механизмов межслоевой проводимости по локальным кристаллическим дефектам.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению волн зарядовой или спиновой

плотности в магнитном поле и их влиянию на электронную проводимость и магнитосопротивление. С помощью функционала Гинзбурга-Ландау исследована структура параметра порядка и фазовая диаграмма волны зарядовой плотности в сильном магнитном поле, когда волной вектор волны зарядовой плотности смещается, аналогично неоднородной сверхпроводящей ЛОФФ фазе. Показано, что возникающая при этом модуляция параметра порядка волны зарядовой плотности является косинусоидальной, то есть с двумя волновыми векторами. Далее в диссертации изучается так называемая солитонная фаза волны плотности, которая может возникнуть при неидеальном нестинге, и ее появление сильно зависит от деталей закона дисперсии электронов. В последних двух разделах четвертой главы изучается влияние волны плотности на проводимость и магнитосопротивление. В разделе 4.4 исследован скачок анизотропии проводимости при переходе в состояние с волной плотности. На примере трителлуридов редкоземельных металлов показано, что этот скачок в некоторых случаях дает информацию о зависимости от импульса электронов энергетической щели в законе дисперсии при наличии волны плотности. В последнем разделе предложены некоторые качественные эффекты, к которым приводит перестройка поверхности Ферми, вызванная волной зарядовой или спиновой плотности.

В пятой главе изучается сверхпроводимость, возникающая на фоне волны зарядовой или спиновой плотности при неидеальном вложении (нестинге) поверхности Ферми. Показано, что сверхпроводящие свойства при этом могут изменяться неожиданным образом. Во-первых показано, что волна плотности не обязательно экспоненциально подавляет температуру сверхпроводящего перехода, поскольку правильно учитывать не только образование щели волны плотности на уровне Ферми, но и ее влияние на закон дисперсии квазичастиц, которые приводят к сверхпроводимости. Более того, как показано в диссертации, даже если температура сверхпроводящего перехода на фоне волны плотности уменьшается, то тем не менее, верхнее критическое поле сверхпроводящей фазы при этом может возрастать в несколько раз. Этот эффект возникает из-за сильного влияния волны плотности на закон дисперсии квазичастиц на уровне Ферми. В диссертации исследовано взаимодействие спиновой структуры параметров порядка сверхпроводимости и волны спиновой плотности. Показано, что если куперовское спаривание возникает только из-за независящего от спина (зарядового) электрон-электронного взаимодействия, то волна спиновой плотности сильно подавляет синглетную сверхпроводимость и почти не подавляет триплетную. Изучены свойства сверхпроводимости на фоне неоднородной (солитонной) фазы волны плотности. Показано, что как и в случае с открытыми карманами поверхности Ферми, в этом сценарии сосуществования сверхпроводимости и волны плотности, верхнее критическое поле H_{c2} сверхпроводимости также возрастает на фоне волны плотности, а температура сверхпроводящего перехода может оказаться выше, чем в отсутствие волны плотности.

В приложениях к основному тексту диссертации изложены вспомогательные вопросы. Диссертация также содержит заключение, в котором изложены основные выводы диссертации, список из 22 публикаций автора по теме диссертации, и список литературы.

Достоверность выводов диссертации обоснована надежностью применявшихся методов расчета и соответствием используемых теоретических моделей реальным соединениям, а также хорошим согласием с данными физических экспериментов и более поздних теоретических исследований. Основные результаты диссертации обсуждались на многих международных конференциях.

Основные результаты и выводы диссертации являются достаточно общими. Они применимы к многим слоистым проводникам, изучение которых имеет большое научное и практическое значение. Примерами таких соединений являются высокотемпературные сверхпроводники, органические металлы, гетероструктуры, природный и интеркалированный графит, многие редкоземельные и тяжелофермионные соединения. Вклад П.Д. Григорьева в развитие теории магнитосопротивления в слоистых квазидвумерных металлах является весьма существенным и широко цитируемым как российскими, так и зарубежными учеными. Например, автор впервые вычислил квантовые осцилляции межслоевого магнитосопротивления в сильно анизотропных квазидвумерных металлах в пределе, когда отношение между интегралом межслоевого перескока и расстоянием между уровнями Ландау меньше или порядка единицы, что открыло новые важные качественные эффекты. Проведенные автором исследования микроскопической структуры и свойств волн зарядовой/спиновой плотности и сверхпроводимости на их фоне, также являются очень интересными и полезными для понимания и теоретического описания сложных сильно коррелированных ферми-систем, перспективных для науки и ее практического применения.

По тексту диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Было бы уместным обсуждение в первой главе возможных эффектов от включения в гамильтониан межслоевого перескока электронов примесных членов, соответствующих перескоку по локальным кристаллическим дефектам (и, в частности, резонансного туннелирования). Хотя автор рассматривает эффекты нерезонансного туннелирования в третьей главе.
2. При рассмотрении смешанного сверхпроводящего состояния с волной спиновой плотности было бы уместным и интересным обсудить влияние флуктуаций вокруг самосогласованных решений для спиновой плотности на энергию спаривания куперовских пар как дополнительного источника связи электронов.
3. Также уместным было бы рассмотреть влияние на выводы 5-й главы различных возможных симметрий куперовского спаривания: s-волновое и d-волновое спаривание при наличии волн спиновой или зарядовой плотности.

Данные замечания, однако, несколько не умаляют весьма положительную оценку диссертационной работы П.Д. Григорьева, правильность и важность предсказанных в ней новых физических эффектов, высокий теоретический и методический уровень, а также достоверность проделанных исследований.

Докторская диссертация П.Д. Григорьева представляет собой законченный труд, отражающий высокую квалификацию соискателя в области теоретической физики твердого тела. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Научные результаты, полученные диссертантом, являются новыми и актуальными, и имеют существенное значение для исследования электронных свойств сильно анизотропных проводников. Основные выводы и положения диссертации являются новыми, обоснованными и достоверными. Диссертационная работа отвечает требованиям ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям, а автор диссертации Павел Дмитриевич Григорьев заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 -теоретическая физика.

Заведующий кафедрой Теоретической
физики и квантовых технологий
НИТУ «МИСиС», доктор физико-
математических наук, профессор

 Мухин Сергей Иванович

Адрес:

119991, Ленинский проспект, д. 4, г. Москва

Телефон: +7 495 638 45 06

e-mail: i.m.sergei.m@gmail.com

Подпись Мухина Сергея Ивановича удостоверяю:

Проректор по общим вопросам

НИТУ «МИСиС»

09.06.15



Исаев И.М.