

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата физико-математических наук Кугеля Клиmenta Ильичa на диссертационную работу Xорошилova Артёma Леонидовичa "Особенности магнитотранспорта и теплоёмкости каркасных стёкол $No_xLu_{1-x}B_{12}$ ", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Уже в течение нескольких десятилетий изучение сильно коррелированных электронных систем является одним из наиболее актуальных направлений современной физики конденсированного состояния вещества. К этому классу систем относятся такие разнообразные материалы, как магнитные оксиды, халькогениды, силициды, бориды, высокотемпературные сверхпроводники (на основе как меди, так и железа), соединения с тяжёлыми фермионами, низкоразмерные металлооксиды. Тесная взаимосвязь спиновых, зарядовых и решёточных степеней свободы в подобных материалах, а также богатство их фазовой диаграммы, привлекают к ним интерес, как с точки зрения фундаментальной физики, так и возможных приложений. Додекабориды редкоземельных элементов являются очень интересным и в то же время сравнительно малоисследованным классом систем с сильно коррелированными электронами. Благодаря их относительно простой кристаллической структуре и разнообразию магнитных характеристик додекабориды могут служить прекрасными модельными объектами для выявления природы физических процессов, обусловленных сильными корреляциями. Кроме того, из-за сравнительно слабой связи редкоземельных ионов с борным каркасом эти материалы дают возможность исследовать эффекты, связанные с локальным беспорядком и кластеризацией. Поэтому предпринятое в диссертации А.Л. Хорошилова многостороннее экспериментальное исследование магнитотранспортных и термодинамических характеристик твёрдых растворов редкоземельных додекаборидов, направленное на нахождение общих закономерностей в поведении подобных систем, является важным и актуальным.

Одним из существенных достоинств диссертационной работы А.Л. Хорошилова является детальная разработка различных методов анализа экспериментальных данных, которая позволила выявить новые до сих пор неизвестные эффекты и механизмы, обуславливающие особенности поведения термодинамических и транспортных характеристик систем с сильно коррелированными электронами. Эти методы, имеющие весьма широкую применимость, дополнительно подчёркивают научную и практическую ценность представленной диссертации.

Перейдём теперь к более подробному рассмотрению содержания диссертации.

Во Введении ясно формулируется цель работы и решаемые в ней задачи, указывается, в чём состоит их актуальность, новизна, научная и практическая ценность, а также приводятся положения, выносимые на защиту. Даются сведения и об апробации результатов диссертации. Тут, кстати, при перечислении своих достижений автор даже несколько сбился со счёта. Указывается, что "сформулированные в работе выводы были апробированы на 8 международных и 4 российских научных конференциях". А в следующем абзаце при перечислении конкретных конференций упоминаются 12 международных и 8 российских.

Литературный обзор представлен в главе 1, где весьма обстоятельно охарактеризованы различные материалы с сильно коррелированными электронами (манганиты, купраты, пниктиды), подробно описываются различные механизмы магнетосопротивления и, наконец, даётся анализ особенностей магнитной и кристаллической структуры редкоземельных додекаборидов и их электронных и транспортных характеристик. На основе такого обзора выявляются нерешённые задачи и обосновываются направления исследований, описываемых в диссертации. Однако мне кажется, что тут можно было бы ограничиться додекаборидами, поскольку в первой части этой главы описываются в основном материалы, имеющие к теме диссертации только весьма косвенное отношение.

Вторая глава содержит детальное описание методик изготовления и характеризации образцов, а также определения исследуемых физических характеристик. Даны подробные схемы экспериментальных установок и расчётные формулы для обработки полученных данных. Тут следует особо подчеркнуть широкий диапазон физических исследований, проведённых на различных экспериментальных установках, что характеризует А.Л. Хорошилова как квалифицированного физика-экспериментатора, прекрасно владеющего современной методикой эксперимента. К сожалению, в этой главе не уточняется, в разработку каких именно методик диссертант внёс наибольший оригинальный вклад.

Глава 3 посвящена подробному изучению теплоёмкости твёрдых растворов замещения $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ с концентрацией примесей гольмия от нуля до единицы, в широком интервале температур и магнитных полей. Для высоких концентраций гольмия $x > 0.5$ измерения теплоёмкости дополнены данными по намагниченности образцов. Важнейшим результатом этой главы, имеющим фундаментальное значение, является обнаружение сильной зависимости величины теплоёмкости от направления магнитного поля относительно кристаллографических осей. Особо необычным является наблюдение этого

эффекта для малых концентраций гольмия, т.е. в парамагнитном состоянии, что автор обоснованно связывает с формированием высокочастотных осцилляций зарядовой плотности - динамических зарядовых страйпов вдоль направления $<110>$. При сравнительно высоких концентрациях гольмия совместная обработка данных по теплоёмкости, намагниченности и магнетосопротивлению позволила построить ряд нетривиальных фазовых диаграмм на плоскости температура-магнитное поле. Вид этих диаграмм существенным образом зависит от концентрации гольмия и от направления магнитного поля. Эти результаты существенно расширяют имеющиеся представления об особенностях магнитных явлений в редкоземельных гексаборидах. Следует, однако, отметить, что автор не приводит характеристик наблюдаемых магнитных фаз и не обсуждает вопрос о роде описываемых фазовых переходов. Не обсуждается также приводимая оценка характерной частоты зарядовых осцилляций, ответственных за страйпы.

В главе 4 представлены результаты измерений удельного сопротивления и поперечного магнетосопротивления системы $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ при фиксированном направлении магнитного поля и тока относительно кристаллографических осей. Полученные результаты позволили детально проанализировать возможные вклады в магнетосопротивление и уточнить относительную роль различных механизмов рассеяния носителей тока как в парамагнитной, так и в антиферромагнитной фазах. Нужно отметить, что предложенная процедура разделения положительного и отрицательного вкладов в магнетосопротивления носит достаточно общий характер и применима, естественно, не только к данному конкретному семейству додекаборидов, и в дальнейшем должна найти широкое применение в научной практике. На основе этой процедуры, в частности, удалось показать, что основное состояние $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ в антиферромагнитной фазе следует рассматривать как комбинацию магнитоупорядоченного состояния локализованных магнитных моментов $4f$ -оболочки ионов Ho^{3+} и локальных спин-поляризованных областей, участвующих в формировании волны спиновой плотности. А для парамагнитной фазы показано, что отрицательный вклад в магнетосопротивление определяется рассеянием носителей на магнитных моментах антиферромагнитных нанокластеров, образованных ионами Ho^{3+} . К сожалению, в диссертации не приводятся оценки размеров таких нанокластеров.

В главе 5 изложены важные и, я бы даже сказал, красивые результаты, касающиеся магнитной анизотропии удельного сопротивления и поперечного магнетосопротивления $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ при различной ориентации внешнего магнитного поля относительно главных

кристаллографических осей. Среди многочисленных результатов этой главы я бы особо отметил формирование ниже перехода в антиферромагнитное состояние анизотропной картины магнетосопротивления в форме мальтийского креста со множеством магнитных фаз. На основе такой необычной фазовой диаграммы делается важный вывод о возникновении динамических зарядовых страйпов в состоянии каркасного стекла исследуемых додекаборидов. Данный тип электронной неустойчивости, сопровождающийся фазовым расслоением на нанометровом масштабе, оказывается особенно важен для понимания магнетизма систем с сильно коррелированными электронами. Его существование подробно обосновывается путём анализа яннеллеровской динамики борного каркаса в изучаемом классе соединений. В качестве замечания здесь я бы опять отметил отсутствие обсуждения типа магнитной структуры состояний, представленных на фазовой диаграмме.

В Заключении приведены основные результаты диссертации. Результаты эти, конечно, очень интересны, но я бы тут отметил не совсем удачную терминологию. Автор говорит о "возникновении в $\text{Ho}_x\text{Lu}_{1-x}\text{B}_{12}$ кооперативного динамического эффекта Ян-Теллера". Но обычно кооперативный и динамический эффекты противопоставляют друг другу: под кооперативным эффектом Ян-Теллера имеют в виду появление искажений кристаллической решётки как целого, а под динамическим – возникновение связанных электрон-решёточных (вибронных) состояний в отсутствие статических искажений. Тут бы надо было выразиться поаккуратнее.

Приведённые выше замечания имеют в основном технический и рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации, которая представляет собой законченное комплексное исследование, посвящённое актуальным проблемам физики конденсированного состояния и выполненное на высоком научном уровне.

Достоверность полученных результатов подтверждается адекватным выбором методики эксперимента, подробным исследованием влияния различных факторов на чувствительность экспериментальных установок, тщательным анализом экспериментальных данных на основе теоретических моделей и существующих численных расчётов.

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в семи статьях в ведущих физических журналах (среди них две статьи в *Physical Review B* и ещё две в Письмах в *ЖЭТФ*) и доложены на многочисленных представительных научных конференциях в нашей стране и за рубежом. Такой высокий уровень публикаций является

дополнительным свидетельством достоверности, актуальности и новизны представленных в диссертации результатов. Автореферат полно и правильно отражает содержание и результаты диссертации.

По объёму и оригинальности полученных результатов, достоверности, научной и практической ценности диссертационная работа "Особенности магнитотранспорта и теплоёмкости каркасных стёкол $No_xLi_{1-x}B_12$ " удовлетворяет всем необходимым требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук и изложенным в разделе II Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор Хорошилов Артём Леонидович несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической
электродинамики конденсированных сред,
ФГБУН Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН
к. ф.-м. н. (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния)

Климент Ильич Кугель

125412 Россия, г. Москва, ул. Ижорская 13, ИТПЭ РАН
тел: 8 495 3625147, e-mail: klimkugel@gmail.com

"Подпись К.И. Кугеля удостоверяю"
Учёный секретарь ИТПЭ РАН
к. ф.-м. н.

125412 Россия, г. Москва, ул. Ижорская 13 ИТПЭ РАН
тел: 8 495 4859172, e-mail: akunavint45@mail.ru



А.Т. Кунавин