

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИОФ РАН,

член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.

« 05 » марта 2025 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федерального исследовательского центра

«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

на диссертационную работу Мехии Альберто Бандурина

«Магнитотранспортные явления в дираковском полуметалле  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$

и модельных магнитных системах с сильным беспорядком»,

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния»

Диссертация Мехии Альберто Бандурина «Магнитотранспортные явления в дираковском полуметалле  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  и модельных магнитных системах с сильным беспорядком» посвящена изучению влияния магнитной примеси марганца на магнитотранспортные свойства тонкопленочных и поликристаллических образцов арсенида кадмия  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , в частности, на особенности электронного транспорта, связанные с топологически защищенными электронными состояниями и фазовыми переходами типа «топологический полуметалл – тривиальный полуметалл», инициируемыми магнитной компонентой. Для уточнения интерпретации полученных результатов в диссертационной работе в качестве реперных соединений изучены две модельные магнитные системы – композитные кристаллы  $\text{InSb-MnSb}$  и многослойные структуры  $(\text{Ta/FeNi})_n\text{-Ta}$  с высокой степенью структурного и магнитного беспорядка.

### Актуальность темы исследований

Ключевым аспектом успешного развития современных технологий является переход к практическому применению новых материалов, обладающих уникальными характеристиками и позволяющих реализовывать новые принципы работы функциональных устройств. Наличие киральных носителей заряда с бесщелевым линейным спектром в топологических изоляторах и полуметаллах позволяет рассматривать их в качестве перспективной основы для создания целого ряда энергоэффективных устройств электроники и спинтроники. Несмотря на огромный интерес к исследованию топологических материалов, многие аспекты физики этих систем в настоящее время остаются неизученными. Например, магнитные примеси, добавленные в топологическую

систему, необходимы для реализации функциональных свойств, интересных для спинтронных приложений, однако, в отличие от традиционных полупроводников, эффект от такого легирования оказывается гораздо более сложным ввиду тесной связи топологических электронных состояний в электронном спектре с симметрией системы. В результате нарушения симметрии по отношению к обращению времени топологическая система при внесении магнитных атомов может перейти как в другую топологическую фазу, так и в тривиальное состояние. Поскольку теоретический анализ магнитных топологических систем в значительной степени затруднен, идентификация эффектов, вызванных магнитным легированием, остаётся прерогативой экспериментальной науки. Подобные исследования принципиально важны для расширения фундаментальных представлений о физике топологических материалов и возможностей их практических применений. В свою очередь, исследования топологически тривиальных магнитных систем с сильным структурным/магнитным беспорядком интересны как с точки зрения фундаментальной физики конденсированного состояния и магнетизма, так и для оценки функциональных характеристик данных материалов. В целом, сравнительный анализ влияния магнитного беспорядка на процессы переноса заряда в системах с различными (топологическими или «классическими») носителями заряда является достаточно уникальной и интересной научной задачей, что определяет несомненную актуальность диссертационной работы Мехии А.Б.

### Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 148 страниц, включая 8 таблиц и 59 рисунков. Список литературы содержит 186 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна и значимость работы, сформулированы выносимые на защиту положения, показан личный вклад соискателя, а также представлены список публикаций по теме и сведения об апробации работы.

В **первой главе**, содержащей обзор литературы по теме диссертации, приведены краткие сведения об электронном транспорте в конденсированных средах, рассмотрены свойства металлов и тонких пленок с высокой степенью беспорядка. В главе описаны основные особенности взаимодействия зонных носителей заряда с магнитной подсистемой объемных материалов, приведены известные данные по структурным и магнитным свойствам соединений  $\text{MnSb}$  и  $\text{FeNi}$ , используемых в качестве магнитной компоненты в модельных системах. Приведено базовое описание топологических систем, в частности, дираковских и вейлевских полуметаллов, отмечены специфические эффекты, свидетельствующие о наличии топологически защищенных носителей заряда. В заключительной части главы описаны структурные особенности и основные свойства дираковского полуметалла  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  и приведено обобщение известных работ по исследованию влияния модификации состава на свойства данного соединения.

Во **второй главе** подробно описаны методики синтеза исследованных систем, приведены результаты характеризации структуры и состава исследуемых образцов, представлено детальное описание измерительной установки и методики измерений, проанализированы ошибки измерений.



В третьей главе обсуждаются результаты и детали расчёта зонной структуры арсенида кадмия с добавлением марганца. В частности, автором подробно проанализированы возможные конфигурации пары ионов марганца в позициях замещения атомов кадмия. Из анализа зонной структуры сделан важный вывод об условиях наблюдения эффектов легирования марганцем, ограниченных значениями отношения уровня Ферми, лежащего выше дна зоны проводимости, к ширине запрещенной зоны  $E_F/E_g \leq 1$ . Из анализа результатов исследования магнитотранспортных свойств тонких плёнок  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  с  $x = 0, 0.017, 0.033$  отмечено заметное падение подвижностей носителей заряда при добавлении марганца, что свидетельствует о сопутствующем росте беспорядка. Показано наличие вклада эффектов квантовой интерференции при низких температурах, обнаружено, что тип соответствующей поправки меняется с увеличением содержания марганца (с переходом от слабой антилокализации к слабой локализации). Полученный результат автор обоснованно интерпретирует как следствие разрушения топологической фазы в материале, что согласуется с результатами расчёта зонной структуры  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ .

Четвертая глава посвящена исследованию легированных объемных поликристаллических образцов арсенида кадмия  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  с  $x = 0 - 0.08$ . Приведена оценка микроструктурных параметров образцов, в частности, обнаружено, что, несмотря на стабилизацию неосновной полиморфной модификации арсенида кадмия, средний размер кристаллита практически не зависит от содержания марганца. Из анализа температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла показано, что, как и в случае тонких плёнок, увеличение содержания марганца приводит к росту беспорядка в системе, при этом проявления аномального эффекта Холла не обнаружено. Обнаруженное увеличение плотности носителей заряда с ростом концентрации марганца автор связывает с размещением ионов Mn в междоузлиях решётки. Из сравнения длины свободного пробега электронов со средним размером кристаллита сделан обоснованный вывод о том, что поликристаллическая структура исследуемых образцов не приводит к качественному отличию их электронных свойств относительно характеристик монокристаллов. Исследования магнитосопротивления поликристаллов  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  выявили наличие выраженной компоненты, линейной по магнитному полю в полях выше 0,7 Тл. Из обсуждения моделей, описывающих эффект линейного магнитосопротивления, автором показано, что наблюдаемое уменьшение амплитуды линейного по полю вклада с ростом концентрации марганца можно объяснить в рамках исходного зонного спектра  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  при сохранении фазы дираковского полуметалла в исследуемых поликристаллах. Обнаруженное необычное поведение при достаточно высоких значениях энергии Ферми согласуется с результатами зонных расчётов.

В диссертационной работе отмечено, что одной из возможных причин отсутствия аномального эффекта Холла в поликристаллах и пленках арсенида кадмия  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  может являться высокий уровень структурного и магнитного беспорядка. В связи с этим, для уточнения интерпретации результатов, полученных при исследовании магнитотранспортных свойств топологически нетривиальных фаз, в работе были исследованы и модельные магнитные системы.

Пятая глава посвящена магнитотранспортным исследованиям образцов эвтектических композитных кристаллов  $\text{InSb-MnSn}$  с различными ориентациями игольчатых кристаллитов антимонида марганца относительно измерительного тока.



Показано, что приложение и снятие гидростатического давления до 8 ГПа приводит к необратимым изменениям в данных системах. В частности, барическая обработка подавляет вклад включений MnSb в удельное сопротивление и эффект Холла и инициирует существенный рост степени беспорядка в матрице InSb, что, в свою очередь, приводит к смене характера температурной зависимости проводимости. Тем не менее, в обоих образцах с различной ориентацией игольчатых включений MnSb при низких температурах обнаружены аномальный эффект Холла и отрицательное магнитосопротивление, которое автор связывает со вкладом спин-зависимого рассеяния. В работе показано, что указанные эффекты, характерные для большинства разбавленных магнитных полупроводников, связаны с особенностями рассеяния носителей заряда на ионах марганца, растворенных в матрице InSb, и сохраняются несмотря на высокую степень беспорядка в системе с малым содержанием магнитных атомов.

В **шестой главе** исследуются многослойные структуры Ta/FeNi двух серий: с варьированием толщины слоя тантала (от 1,3 до 4,6 нм) при толщине слоя пермаллоя 0,52 нм и с варьированием толщины слоя пермаллоя (от 1 до 4 нм) при толщине слоя тантала 2,5 нм. В случае nanoостровковой морфологии слоёв пермаллоя FeNi сопротивление таких структур определяется проводимостью слоёв тантала и характеризуется отрицательным температурным коэффициентом. Вычисленные транспортные параметры укладываются в рамки линейной корреляции Мооя. В частности, максимальное наблюдаемое сопротивление для данных структур существенно превосходит предел Иоффе-Регеля, а увеличение толщины слоя FeNi и уменьшение толщины слоя Ta заметно понижает сопротивление системы. Автор объясняет такое поведение наличием существенного магнитного беспорядка, образованного nanoостровками FeNi, который уменьшается при соответствующей вариации толщин слоёв за счет усиления внутрислоевой и межслоевой компонент обменного взаимодействия через носители заряда в слоях Ta. Однако, даже в структурах с nanoостровковыми слоями FeNi, наблюдается отчетливый вклад аномального эффекта Холла и отрицательного магнитосопротивления, характерного для вклада спин-зависимого рассеяния носителей заряда. Таким образом, автор заключает, что высокая степень магнитного беспорядка, также как и структурного, не подавляет эффектов электронного транспорта, характерных для тривиальных систем с магнитной компонентой.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

### Научная новизна исследований

В рамках диссертационной работы Мехии А.Б. проведено комплексное исследование влияния добавления магнитных атомов марганца на электронные свойства дираковского полуметалла  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ . Оригинальные экспериментальные результаты, полученные для тонких плёнок и объемных поликристаллов, находятся в согласии с результатами теоретических расчётов зонной структуры  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ , обсуждаемыми в работе. Важно отметить, что, несмотря на наличие ряда работ с аналогичными зонными расчётами, представленные оригинальные результаты впервые показали доминантный вклад антиферромагнитного взаимодействия между парами ионов марганца, согласующийся с результатами ранних экспериментальных работ. Сопоставление магнитотранспортных свойств с зонным спектром позволило выделить зависимость свойств арсенида кадмия от энергии Ферми. В частности, автором продемонстрировано, что наиболее существенные изменения свойств арсенида кадмия при добавлении ионов марганца происходят на масштабах энергии Ферми порядка ширины запрещенной зоны,



возникающей в дираковской точке, в то время как для носителей заряда с высокими значениями энергии Ферми эффектов подавления топологической фазы не обнаружено. Несмотря на то, что в литературе имеются указания на подобную корреляцию, подход к изучению фазовых переходов электронной структуры, предложенный автором диссертации, практически не встречается и полученные результаты, безусловно, определяют новизну работы.

Новизна авторского подхода к исследованию реперных магнитных систем определяется сочетанием поставленной задачи – изучения влияния сильного структурного и магнитного беспорядка на магнитотранспортные свойства – и методов создания соответствующего беспорядка. Так, двухфазный состав композитных кристаллов  $\text{InSb-MnSb}$ , по-видимому, определяет необратимый характер структурных превращений в системе под давлением. В работе показано, что транспортные свойства после декомпрессии определяются исключительно матрицей  $\text{InSb}$ , а сопутствующий рост беспорядка оказывается настолько сильным, что меняет характер её проводимости, приближая систему к полупроводниковому состоянию. В свою очередь, параметры электронного транспорта многослойных структур  $\text{Ta/FeNi}$  при вариации толщин слоёв с весьма высокой точностью следуют линейной корреляции Мооля в широком диапазоне значений сопротивления по обе стороны предела Мотта-Иоффе-Регеля. Существенный вклад в эти изменения вносит вариация магнитного беспорядка, который до определённой степени оказывается контролируемым. В сравнении с известными исследованиями магнитных систем, обычно рассматривающими предельные случаи дрейфовой и прыжковой проводимости, полученные результаты несомненно указывают на сохранение вклада аномального эффекта Холла при сильном росте степени структурного и магнитного беспорядка и подтверждают вывод автора о том, что отсутствие аномального эффекта Холла в  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$ , является особенностью данной системы, а не конкретных образцов.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Значительная часть авторского текста диссертации основана на комплексном анализе экспериментальных данных с учетом существующих теоретических и эмпирических моделей, поэтому представленные в работе результаты выводы хорошо аргументированы и обоснованы. Достоверность работы определяется применением современного экспериментального оборудования и стандартных методологий измерений и обработки данных. Полученные результаты не противоречат имеющимся данным для исследованных систем, а применяемые подходы и модели в анализе являются общеизвестными. Результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, включая журналы первого квартиля Acta Materialia и Scientific Reports.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты, полученные в диссертационной работе Мехии А.Б., существенно дополняют известную информацию о фазовых переходах, инициированных изменением электронной структуры топологических материалов. Результаты исследований процессов переноса заряда в тонкопленочных и поликристаллических образцах  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  важны для планирования и проведения аналогичных экспериментов в различных материалах с нетривиальной топологией зонного спектра. Новые знания об электронных свойствах



топологических и традиционных систем при изменении их состава крайне актуальны для создания функциональных устройств на их основе. В частности, обнаруженные пределы устойчивости топологической фазы по отношению к добавлению магнитных атомов важны для разработки и изготовления устройств спинтроники. В свою очередь, возможность контролируемой модификации параметров электронного транспорта при изменении степени беспорядка в магнитолегированных полупроводниках и структурах позволяет использовать данный параметр для инжиниринга свойств соответствующих устройств. В целом, полученные в работе результаты представляют несомненный научный и практический интерес и могут быть рекомендованы для научных организаций и университетов, участвующих в разработке и исследованиях новых функциональных материалов (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Московский физико-технический институт, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Сколковский институт науки и технологий, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Университет науки и технологий МИСИС и другие организации).

#### **Общая оценка работы**

На основании рассмотрения материала диссертации, автореферата и представления работы на семинаре с публичным обсуждением ее результатов, ведущая организация считает, что диссертационная работа Мехии Альберто Бандурина представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне.

Тема и содержание диссертации полностью соответствует научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Тема диссертации является актуальной, полученные в работе результаты являются новыми и оригинальными. Следует особо отметить новые результаты, относящиеся к изучению перехода  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  в тривиальную фазу при добавлении Mn и установлению определяющей роли плотности носителей заряда в наблюдении проявлений данного перехода. Полученные результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и в полной мере изложены в 5 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

#### **Замечания по работе**

При изучении диссертационной работы возник ряд замечаний:

1) Для данных рентгенофазового анализа, привлеченных для характеристики тонких плёнок и поликристаллов  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  с различным содержанием магнитной компоненты (глава 2, рис. 2.2 и 2.5), автором использованы разные обозначения пространственных групп для  $\alpha$ -модификации арсенида кадмия, при этом  $\alpha$ -фазе соответствуют различные индексы дифракционных пиков (за исключением общего рефлекса [408]).

2) Обнаруженное в работе отрицательное магнитосопротивление для тонкопленочного образца  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  с  $x \sim 0.033$ , которое связывается с формированием щели вблизи дираковской точки, может указывать на переход к режиму рассеяния



носителей на магнитных примесях Mn в матрице арсенида кадмия (например, за счет механизма Иосиды).

3) При обсуждении природы аномального эффекта Холла автор не приводит данных магнитных измерений, которые, в частности, могли бы быть использованы для интерпретации температурной зависимости аномального холловского сопротивления в композитных полупроводниках InSb-MnSb (глава 5, рис.5.6) и многослойных структурах (Ta/FeNi)<sub>N</sub>-Ta (глава 6, рис.6.5 и 6.7а). В частности, инверсия знака холловского сопротивления, наблюдаемая в образце N5 при росте температуры от 80К до 300К может быть связана с уменьшением аномального эффекта Холла, а не с изменением знака коэффициента Холла, отмеченного автором (стр.125, рис. 6.7б).

4) При анализе влияния гидростатического давления на свойства композитных полупроводников InSb-MnSb (стр.102) автор отмечает существенное различие подвижностей носителей заряда при различной ориентации включений MnSb (например,  $22 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  и  $1,2 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  для образцов N1 и N2, соответственно, см. рис.5.2). Между тем, прямой расчет подвижности для образца N2 из данных рис.5.1б дает значения порядка  $16 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ , что не согласуется с утверждением автора.

5) Из сохранения аномального эффекта Холла при сильном росте беспорядка автор делает вывод о том, что отсутствие аномального вклада в холловское сопротивление в  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  является особенностью соединения, а не конкретных образцов. В этой ситуации уместно сравнить экспериментальные данные с теоретическими расчётами кинетических свойств этого материала для уточнения причин подавления аномального эффекта Холла в топологической системе с магнитными примесями.

6) В работе вводятся термины «скалярный беспорядок» и «сигнатуры/сигнатурные эффекты» без конкретизации их смысла. Кроме того, автору не удалось избежать ряда опечаток и жаргонов (например, «ГКЦ-структуру», стр.33, «прозвонки всех контактных пар», стр.64, «на постоянном токе, с частотой коммутации 8 Гц», стр.65, «друдэвский», стр.69, «финитной плотности», стр.75, «спектральные особенности системы», стр.79, «амплитуда отрицательно МС», стр.109, «изъятия вставки с образцом из дьюара и отогреве системы от комнаты», стр.112).

Вышеперечисленные замечания не затрагивают защищаемых положений и не снижают общую высокую положительную оценку работы.

### Заключение

Диссертационная работа «Магнитотранспортные явления в дираковском полуметалле  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  и модельных магнитных системах с сильным беспорядком» подтверждает научную квалификацию Мехии А.Б. и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 16 октября 2024 г.), а её автор, Мехия Альберто Бандурин, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Доклад Мехии А.Б. по материалам диссертации был заслушан и обсуждён на семинаре отдела низких температур и криогенной техники Центра лазерной физики и фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской



академии наук» 20 февраля 2025 года (протокол семинара № 3). Отзыв подготовлен ВРИО заведующего отделом низких температур и криогенной техники Центра лазерной физики и фотоники ИОФ РАН, д.ф.-м.н., доц. Глушковым Владимиром Витальевичем. Отзыв обсужден и утвержден на заседании Учёного совета Центра лазерной физики и фотоники ИОФ РАН 04 марта 2025 года (протокол № 4).

Заместитель директора ИОФ РАН  
по научно-организационной работе,  
ВРИО зав. отделом низких температур  
и криогенной техники Центра лазерной  
физики и фотоники ИОФ РАН д.ф.-м.н., доц.

/ В.В. Глушков/

« 4 » марта 2025 г.

Учёный секретарь Учёного совета Центра  
лазерной физики и фотоники ИОФ РАН,  
к.ф.-м.н.

/ А.В. Богач/

« 04 » 03 2025 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)  
119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38  
Тел.: +7 (499) 503-8734  
Факс: +7 (499) 503-8723  
Email: [office@gpi.ru](mailto:office@gpi.ru)  
т. +7 (499) 503-8734



Список основных работ сотрудников ведущей организации ИОФ РАН  
по тематике диссертации А.Б. Мехии «Магнитотранспортные явления в дираковском  
полуметалле  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x)_3\text{As}_2$  и модельных магнитных системах с сильным беспорядком»  
в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Semeno A.V., Anisimov M.A., Bogach A.V., Demishev S.V., Chtchelkachev N.M., Krasnorussky V.N., Griбанова S.V., Dunaev S.F., Griбанов A.V.,  $\text{Ce}_2\text{Pd}_{21}\text{Si}_6$  vs.  $\text{Ce}_3\text{Pd}_{20}\text{Si}_6$ : Effect of Ce/Pd substitution on the physical properties // Journal of Solid State Chemistry. - 2024. - V. 330 - P. 124462. DOI: 10.1016/j.jssc.2023.124462.
2. Azarevich A., Bogach A., Bolotina N., Khrykina O., Shitsevalova N., Polovets S., Filipov V., Gabani S., Kacmarcik J., Flachbart K., Voronov V., Sluchanko N., Maltese Cross-type magnetic phase diagrams in  $\text{Tm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{Bi}_2$  antiferromagnets with Yb-valence instability and dynamic charge stripes // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2023. - V. 574. - P. 170671. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170671.
3. Glushkov V.V., Zhurkin V.S., Bozhko A.D., Voronov V.V., Filipov V.B., Gabani S., Flachbart K., Shitsevalova N.Y., Surface conductivity in  $\text{SmB}_6$  // Solid State Sciences. - 2023. - Vol. 142. - P. 107247. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2023.107247.
4. Bolotina N.B., Khrykina O.N., Azarevich A.N., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Gavrilkin S.Yu., Tsvetkov A.Yu., Gabani S., Flachbart K., Voronov V.V., Sluchanko N.E., Low temperature singularities of electron density in a two-gap superconductor  $\text{ZrBi}_2$ . // Solid State Sciences. // 2023. - Vol. 142. - P.107245. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2023.107245.
5. Случанко Н. Е., Жукова Е. С., Алябьева Л. Н., Горшунов Б. П., Муратов А. В., Алещенко Ю. А., Азаревич А. Н., Анисимов М. А., Шицевалова Н. Ю., Половец С. Е., Филипов В. Б., Коллективные и квазилокальные моды в оптических спектрах гексаборидов  $\text{Yb}_6$  и  $\text{YbB}_6$  с ян-теллеровской структурной неустойчивостью// ЖЭТФ. 2023. - Том 163. - С. 172. DOI: 10.31857/S0044451023020049.
6. Глушков В.В., Журкин В.С., Божко А.Д., Кудрявцев О.С., Андрюшечкин Б.В., Комаров Н.С., Воронов В.В., Шицевалова Н.Ю., Филипов В.Б., Критерий поверхностного электронного транспорта в коррелированном топологическом изоляторе  $\text{SmB}_6$  // Письма в ЖЭТФ. - 2022. - Т. 116, В. 11. - С. 770-776. DOI 10.31857/S123456782223005.
7. Semeno A.V., Krasnorussky V.N., Bogach A.V., Demishev S.V., Griбанов S.V., Kalmykov K.B., Griбанов A.V., Suppression of Kondo spin-fluctuations as the origin of metamagnetic transition in the new ternary intermetallic  $\text{Ce}_3\text{Pd}_2\text{Ge}_7$ . // Journal of Alloys and Compounds. - 2022. - V. 924. - P. 166456. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.166456.
8. Bolotina N. B., Khrykina O. N., Azarevich A. N., Shitsevalova N. Yu., Filipov V. B., Gavrilkin S. Yu., Mitsen K. V., Voronov V. V., Sluchanko N. E., Checkerboard patterns of charge stripes in the two-gap superconductor  $\text{ZrBi}_2$  // Physical Review B. - 2022. - Vol. 105. - P. 054511. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.054511>.
9. Boldyrev K.N., Kuz'min N.N., Mukhin A.A., Ivanov V.Yu., Dobretsova E.A., Popova E.A., Gavrilkin S.Yu., Leonyuk N.I., Maltsev V.V., Malkin B.Z., Popova M.N., Thermal and magnetic properties and optical spectroscopy of  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$  // Physical Review Materials. - 2021. - Vol. 5, N. 10. - P. 104413. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.5.104413.
10. Azarevich A.A., Bogach A.V., Glushkov V.V., Demishev S.V., Khoroshilov A.L., Krasikov K.M., Voronov V.V., Shitsevalova N.Yu., Filipov V.B., Gabani S., Flachbart K., Kuznetsov A.V., Gavrilkin S.Yu., Mitsen K., Blundell S.J., Sluchanko N.E., Inhomogeneous



- superconductivity in  $\text{Lu}_x\text{Zr}_{1-x}\text{B}_{12}$  dodecaborides with dynamic charge stripes. // Physical Review B. - 2021. - V. 103. - P. 104515. DOI: 10.1103/PhysRevB.103.104515.
11. Anisimov M.A., Samarin N.A., Zhurkin V.S., Bogach A.V., Demishev S.V., Voronov V.V., Shitsevalova N.Yu., Tevchenko A.V., Filipov V.B., Glushkov V.V., Evolution of thermoelectric properties in  $\text{Eu}_x\text{Yb}_{1-x}\text{B}_6$  family. // Journal of Physics: Condensed Matter. - 2020. - V. 32. - P. 465601. DOI: 10.1088/1361-648x/aba864.
  12. Backai J., Flachbart K., Gabani S., Gazo E., Orendac M., Pristas G., Sluchanko N., Dukhnenko A., Filipov V., Shitsevalova N., Superconducting phase diagram of  $\text{LuB}_{12}$  and  $\text{Lu}_{1-x}\text{Zr}_x\text{B}_{12}$  ( $x \leq 0.45$ ) down to 50 mK. // Acta Physica Polonica A. - 2020. - V. 137, No.5. - P. 791-793. DOI: 10.12693/APhysPolA.137.791.