

УТВЕРЖДАЮ
Проректор БашГУ
по научной и
инновационной работе

С.А. Мустафина

« 02 » сентября 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Космачева О.А «Спиновые нематики и сильноанизотропные магнетики», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

Большой интерес у исследователей вызывает анализ фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений магнитоупорядоченных систем (как ферро-, так и антиферромагнитных), обладающих целым рядом специфических свойств, таких, например, как эффект квантового сокращения спина. Как было впервые показано Морией при $\beta/(2J_0) > 1$, даже при абсолютном нуле температур ($T = 0$) в отсутствие внешнего поля реализуется немагнитное, квадрупольно - упорядоченное основное состояние. Такого рода магнитоупорядоченные системы получили название негейзенберговских, поскольку в этом случае модуль магнитного момента не сохраняется, и, следовательно, динамику магнитного момента невозможно описывать в рамках уравнения Ландау-Лифшица. Интерес к магнетикам с большой одноионной анизотропией прежде всего обусловлен тем, что в такого рода системах квантовые свойства отдельных спинов в эффективном магнитном поле играют решающую роль в формировании динамических и термодинамических свойств магнетиков. Это обстоятельство, в свою очередь, является важным в такой бурно развивающейся области физики конденсированного состояния как спинtronика. Изменение фазовых состояний, типов фазовых переходов, возникновение так называемых продольных спиновых волн – все эти эффекты наблюдаются в негейзенберговских магнетиках.

Не менее интересен для исследователей и вопрос изучения магнитных свойств так называемых спиновых нематиков, т.е. изотропных магнитных систем (в которых возможно, как ферро-, так и антиферромагнитное упорядочение), в обменном взаимодействии которых учитывается не только билинейное взаимодействие, но и взаимодействие, обусловленное высшими спиновыми инвариантами. Для магнетиков со спином $S > 1/2$ (их называют иногда, несколько условно, квантовыми магнетиками) квантовые флуктуации не малы и приводят к существенным отклонениям от стандартной картины магнитного упорядочения, для которой характерно постоянство длин магнитных моментов подрешеток. Наиболее известны примеры Халдейновского состояния в одномерном (1D) антиферромагнетике со спином единица или эффектов квантового сокращения спина, приводящего к существованию так называемых квантовых нематических фаз. Симметрия этих фаз связана с ненулевыми вакуумными средними от билинейных комбинаций компонент спинов. По существу, в таких материалах спин представляет собой немагнитный асимметричный объект (квадрупольный эллипсоид). В последние годы интерес к таким системам вырос в связи с обнаружением подобных состояний в бозе-эйнштейновских конденсатах нейтральных атомов. Для таких материалов как статические, так особенно динамические свойства иные, чем для стандартных магнетиков. Особенно это важно для случаев спиновых нематиков со спином магнитного иона $S=1, 3/2$ и 2. Несмотря на то, что модели спиновых нематиков с $S=1$ достаточно давно и подробно изучаются, остался еще большой круг задач, требующих своего решения.

Таким образом, актуальность диссертационной работы Космачева О.А., посвященной теоретическому исследованию фазовых состояний и спектральных закономерностей магнитоупорядоченных систем, обладающих необычными свойствами, не вызывает сомнений.

Структура и основное содержание работы

Диссертация имеет традиционную структуру и включает в себя: введение, пять разделов, представляющих оригинальные результаты, заключение и список используемых источников из 299 наименований. Общий объем диссертации составляет 351 страницу текста с 62 рисунками.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первом разделе рассматривается вопрос о возможности реализации «сверхтвердой» магнитной фазы в антиферромагнетике с $S=1$ и большой одноионной анизотропией. Исследуется двухподрешеточный легкоплоскостной антиферромагнетик с эквивалентными подрешетками во внешнем «продольном» поле. Анализ плотности свободной энергии показывает, что в зависимости от соотношения материальных параметров в системе могут реализовываться различные фазовые состояния. Так, в области больших полей антиферромагнетик находится в ферромагнитной фазе, в которой намагниченности подрешеток направлены вдоль внешнего магнитного поля и достигают своего максимального значения. В области малых полей система ведет себя принципиально иначе: при таких полях углы поворота подрешеток становятся равными $\pm\pi/2$. Но это состояние не является антиферромагнитным, поскольку при больших значениях константы одноионной анизотропии в системе становится существенным эффект квантового сокращения спина. В результате при малых полях намагниченность подрешеток (на один узел) становится равной нулю и магнетик находится в квадрупольной фазе. При промежуточных значениях поля реализуется неколлинеарная фаза, в которой намагниченности подрешеток изменяются по модулю и направлению при изменении внешнего магнитного поля. По сути, эта фаза является магнитным аналогом «сверхтвердой» фазы.

В случае «поперечного» поля при достаточно больших полях векторы намагниченности подрешеток параллельны внешнему полю, но их модуль не достигает насыщения. Такое фазовое состояние авторы назвали коллинеарной квадрупольно-ферромагнитной фазой. Если магнитное поле становится меньше критического поля, очевидно, что векторы намагниченности подрешеток не будут коллинеарными направлению внешнего магнитного поля, а будут составлять некоторый угол с направлением поля. Это состояние является спин-флоп фазой. Т.е. в случае поперечной ориентации внешнего магнитного поля вместо «сверхтвердой» магнитной фазы реализуется спин-флоп фаза. Исследование возможности реализации «сверхтвердой» магнитной фазы в легкоплоскостном изингоподобном антиферромагнетике в продольном поле позволило установить ряд интересных особенностей в отличие от предыдущей модели.

В заключении первого раздела исследованы фазовые состояния и спектры элементарных возбуждений ультратонкой сильно анизотропной пленки со спином единица и фruстрированным изингоподобным обменным взаимодействием в продольном внешнем поле.

Во втором разделе изучается роль квантовых эффектов анизотропного ферримагнетика и легкоплоскостного ферромагнетика со спином $S=1$ при температуре, отличной от нуля. Исследуется двухподрешеточный коллинеарный магнетик с нескомпенсированными магнитными моментами подрешеток: спин магнитного иона одной подрешетки $S_1 = 1$, а другой— $S_2=1/2$. Кроме того, первая подрешетка является анизотропной с одноионной анизотропией типа „легкая плоскость“. Анализ зависимости намагниченности подрешеток (при низких температурах) от соотношений материальных констант показал, что в случае, когда константа одноионной анизотропии превосходит значения констант обменных взаимодействий, намагниченность первой подрешетки становится существенно меньше максимально возможного значения, т. е. происходит квантовое сокращение спина. Наличие этого эффекта приводит к реализации в ферримагнетике точки компенсации. Определены условия ее реализации.

Еще один интересный результат относится к роли квантовых эффектов анизотропного ферримагнетика, исследованного выше, допускающего сокращение спина при ненулевых температурах. Исследование спектров возбуждения анизотропного ферримагнетика, в частности, высокочастотных мод, показало, что эффекты квантового сокращения спина могут быть существенны даже при относительно малых (порядка 5–10 % от обменного интеграла) значениях константы одноионной анизотропии.

В заключение второго раздела исследуется влияние одноионной анизотропии на температурную зависимость намагниченности и спектров элементарных возбуждений ферромагнетика с $S=1$. В результате решения дисперсионного уравнения при произвольных температурах (исключая флюктуационную область) удается найти три ветви элементарных возбуждений. Этот результат является неожиданным, поскольку стандартным результатом является $2S$ ветвей элементарных возбуждений и, поскольку в данном случае $S=1$, то число ветвей должно быть равно двум. Чтобы понять, почему возможен такой результат, рассмотрен случай низких температур. При $T \rightarrow 0$ система находится в основном состоянии, т.е. максимально «заселенным» является самый низкий энергетический уровень E_1 ; вероятность перехода между возбужденными уровнями близка к нулю. При температурах, отличных от нуля, возникает ненулевая вероятность перехода между энергетическими уровнями, лежащими над основным. Особый интерес представляет поведение двух ветвей спектра. При низких температурах и малых значениях константы анизотропии имеет место кроссовер, т.е пересечение голдстоуновской моды и локализованного состояния. С ростом температуры и константы анизотропии между этими состояниями возникает «расталкивание» и, в результате, возникают еще две ветви элементарных возбуждений. Причем, как видно из приведенных в диссертационной работе графиков, величина расталкивания ветвей и точка кроссовера существенно зависят от константы одноионной анизотропии. Так, в изотропной системе точка кроссовера находится при $k / k_B = \pi / 2$. Таким образом, показано, что в рассматриваемом случае в системе, помимо известных двух стандартных мод – поперечной и продольной, –

возникает дополнительная ветвь возбуждений, наличие которой связано с ненулевой вероятностью переходов между возбужденными уровнями магнитного иона при конечных температурах. Эта мода дает немалый вклад в поглощение энергии и обладает существенной дисперсией.

Третий раздел посвящен исследованию фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений изотропного негейзенберговского магнетика с $S=1$ и $S=3/2$ с учетом всех спиновых инвариантов. Вначале в качестве исследуемой системы рассматривается модель изотропного ферромагнетика с биквадратичным обменным взаимодействием. Анализ плотности свободной энергии в пределе низких температур показал, что в зависимости от соотношений обменных констант реализуются одноподрешеточные фазы – ферромагнитная (FM) и нематическая (N); двухподрешеточные фазы – антиферромагнитная (AFM) и ортогонально нематическая (ON). В FM фазе магнитный момент насыщен, фаза характеризуется также квадрупольным параметром порядка. В N фазе модуль среднего спина равен нулю, отличными от нуля будут квадрупольные параметры порядка. Из вида квадрупольных средних следует, что нематическое состояние характеризуется спонтанным нарушением вращательной симметрии, а также является инвариантным относительно обращения времени. В случае отрицательного значения константы гейзенберговского взаимодействия реализуются двухподрешеточные фазы. В ортогонально нематической двухподрешеточной фазе намагниченность равна нулю в обеих подрешетках. Основные состояния подрешеток ортогональны и, следовательно, ортогональными являются направления главных осей тензора квадрупольных моментов подрешеток. Исследование спектров возбуждения показало, что фазовые переходы ортогональный нематик–ферромагнетик и ортогональный нематик–антиферромагнетик, происходящие при изменении параметра J/K , являются вырожденными переходами первого рода, т.к. на линиях фазового перехода параметры порядка, характеризующие граничащие фазовые состояния, изменяются скачком, но при этом область существования фаз отсутствует. Кроме того, щель в спектрах элементарных возбуждений обращается в ноль на линии фазового перехода.

Возможность существования спиновых нематических состояний для систем с полуцелым спином $S=3/2$ гораздо менее изучена, хотя этот вопрос имеет важное значение для исследования физических свойств фермисистем. Анализ одноузельной задачи позволил установить фазы, возможные в рассматриваемом магнетике: одноподрешеточные – FM и N; двухподрешеточные – AFM и антинематическая (AN).

Интересна динамика рассматриваемого магнетика. Например, в ферромагнитной фазе имеется три ветви возбуждения. Мода один – бесщелевая голдстоуновская мода с параболическим законом дисперсии при малых k , характерная для изотропного ферромагнетика, – соответствует малым отклонениям по направлению вектора магнитного момента от главной оси. Физический смысл второй моды такой же, как для ферромагнетика со спином $S=1$, то есть эта мода описывает «продольную» динамику спина – включает продольные колебания модуля вектора намагниченности, направление которого остается параллельным главной оси эллипсоида квадрупольных моментов. Мода три определяется спецификой динамики магнетика со спином $S=3/2$, которая обусловлена нетривиальными октупольными средними. Ветвь три размягчается в окрестности линии перехода в N-фазу при $k \rightarrow 0$, а в окрестности линии фазового перехода в AN-фазу при $k \rightarrow \pi$. В нематической фазе происходит вырождение двух возбужденных энергетических уровней, поэтому законы дисперсии двух первых мод совпадают. Моды один и два описывают колебания квадрупольного эллипсоида, что и определяет двукратное вырождение этих мод. Таким образом, основная специфика системы со спином $S=3/2$ определяется модой три, которая связана с обменным интегралом и обусловлена динамикой октупольных параметров. Она связана с поворотом «октупольного треугольника» вокруг оси OZ.

В заключение раздела исследуются двумерные «солитоны» в нематической фазе изотропных магнетиков со спином $S=1$ и $S=3/2$. Рассматривается дискретная модель нематика на квадратной решетке. Анализ проведен для приблизительно кругового фрагмента, вырезанного из квадратной решетки размером 20 на 20. Показано, что такой небольшой размер является вполне достаточным. В центре вихря в спиновом нематике формируется несингулярное насыщенное ядро. В центре ядра $|\langle S \rangle| = S$, а квадрупольные средние определяются эллипсоидом вращения с избранной осью, параллельной полю, то есть нематический порядок разрушен, но восстановлен магнитный порядок. Следует отметить, что появление вихревого ядра, ферромагнитного или антиферромагнитного, связано с понижением симметрии вихря, подобно стандартному поведению параметра порядка вблизи точки фазового перехода второго рода. Это может быть использовано для симметрийного анализа переходов различных вихревых состояний.

В четвертом разделе исследуется влияние обменной и одноионной анизотропии на фазовые состояния негейзенберговского магнетика. Рассматривается ферромагнетик с биквадратичным обменным взаимодействием и гексагональной одноионной анизотропией. Анализ плотности свободной энергии показал, что в случае, когда отношение констант анизотропии к обмену мало, результаты полностью соответствуют результатам, полученным для гексагонального кристалла – реализуются легкососная, легкоплоскостная и угловая фазы. Если константы анизотропии становятся сравнимы с константами обмена, то кроме магнитно упорядоченных фаз возможна реализация квадрупольных фаз. Исследование спектров возбуждения показывает, что фазовые переходы между ферромагнитными фазами и квадрупольными могут быть как первого рода, так и второго. Также исследовано влияние обменной анизотропии на фазовые состояния негейзенберговского магнетика с $S=1$. Билинейное и биквадратичное обменные взаимодействия являются анизотропными, причем

параметр обменной анизотропии $0 \leq \Delta \leq 1$. При $\Delta=1$ обменные взаимодействия становятся изотропными, что позволяет провести сравнение полученных результатов с известными предельными случаями.

Пятый раздел посвящен изучению фазовых состояний и их устойчивости относительно произвольных возбуждений для модели изотропного магнетика со спином $S=2$ в приближении среднего поля с взаимодействием ближайших соседей на решетке, допускающей разбиение на две подрешетки. Исследование свободной энергии системы при нулевой температуре показывает, что реализуется ферромагнитное состояние, в котором среднее значение спина на узле максимальное и равно 2. Следующая устойчивая фаза – тетраэдрический нематик. Это состояние было найдено в модели конденсата Бозе-газа атомов со спином $S=2$ и контактным взаимодействием, используя описание системы с помощью $2S$ точек на единичной сфере. Состояние магнетика с $S=2$ характеризуется четырьмя точками, совпадающими с вершинами правильного тетраэдра, вписанного в сферу. В этой фазе средний магнитный момент равен нулю, а квадрупольный эллипсоид вырожден в сферу. Спонтанное нарушение симметрии определяется средними, кубическими по компонентам оператором спина, которые не инвариантны относительно инверсии времени $t \rightarrow -t$.

Еще одно состояние, реализующееся в магнетике – спиновое нематическое состояние с нулевым средним спином на узле. Геометрическим образом этого состояния в спиновом пространстве является двухосный эллипсоид, «гофрированный» в плоскости XOY . Вполне естественно ожидать, что полный набор состояний магнетика с $S=2$ включает также фазы с различными состояниями спинов в двух подрешетках. Наличие одного такого состояния очевидно – это антиферромагнитное состояние. Анализ энергии основного состояния двухподрешеточного магнетика показал, что кроме АФМ фазы реализуется двухподрешеточная фаза с тетраэдрической симметрией. Геометрическим образом каждой из подрешеток этого состояния в спиновом пространстве является тетраэдр. Причем вершины тетраэдров обеих подрешеток противоположно направлены относительно оси OZ , а основания – развернуты на угол $\pi/3$ вокруг оси OZ . Поэтому это состояние названо тетраэдрической антинематической фазой. Полученные двухподрешеточные устойчивые состояния в данной модели являются не единственными. Существуют более сложные двухподрешеточные спиновые конфигурации. Реализация и устойчивость новых фаз зависит от соотношений обменных интегралов и их знаков. Также как и для магнетика с $S=1$ реализуются ортогонально нематические двухподрешеточные фазы, геометрическим образом которых являются два двухосных эллипсоида, главные оси которых ортогональны друг другу. Еще одно двухподрешеточное нематическое состояние возникает в случае большого отрицательного значения интеграла обменного взаимодействия $F < 0$. Геометрическими образами этого состояния в спиновом пространстве являются одноосные эллипсоиды, оси которых параллельны. Однако, как и в ON-фазе, эллипсоиды являются «гофрированными» в плоскости, перпендикулярной главной оси. Кроме того, анализ свободной энергии показал, что в магнетике с $S=2$ могут реализовываться двухподрешеточные структуры с неэквивалентными подрешетками. Эти фазы характеризуются ненасыщенностью среднего спина одной из подрешеток, а магнитные моменты подрешеток либо коллинеарны, либо антиколлинеарны.

Новизна результатов диссертационной работы

К наиболее интересным новым результатам работы следует отнести следующие.

- Выяснена роль квантовых эффектов в простейшей модели анизотропного ферримагнетика при температуре, отличной от нуля. Показано, что даже малая одноионная анизотропия (значительно меньшая значений констант обменного взаимодействия) при отличной от нуля температуре приводит к ощутимому уменьшению среднего значения спина на узле анизотропной подрешетки. А эффект квантового сокращения спина оказывает существенное влияние не только на статические, но и на динамические свойства ферримагнетика.

- Впервые исследовано поведение сильноанизотропного фruстрированного антиферромагнетика со спином единица, в котором возможно существование «сверхтвердой» магнитной фазы. Предсказана возможность существования «сверхтвердого» магнитного состояния в продольном внешнем магнитном поле. Показано, что в случае поперечного внешнего поля в рассматриваемой системе «сверхтвердая» магнитная фаза не реализуется.

- Показано, что для магнетиков со спином $S=1$ и $S=3/2$, в которых реализуется состояние спинового нематика, существуют двумерные топологические солитоны – вихри. Обнаружены несколько типов таких вихрей, с сингулярностью в центре и с несингулярным ядром, в котором разрушен нематический порядок. Ядро вихря характеризуется восстановлением магнитного порядка, который может быть ферромагнитным или антиферромагнитным.

- Исследована модель негейзенберговского ферромагнетика со сложной анизотропией обменных взаимодействий. Учет анизотропных обменных взаимодействий приводит к снятию вырождения по направлению вектора магнитного момента в ферромагнитной фазе и вектора-директора в нематическом состоянии. Показано, что учет анизотропного биквадратичного обменного взаимодействия более сложного вида приводит к реализации угловых ферромагнитной и нематической фаз. Анализ динамических и статических свойств системы в случае реализации только тензорных фаз показал, что фазовые переходы по тензорному параметру порядка по характеру близки к ориентационным фазовым переходам. Также показано,

что фазовые переходы, сопровождающиеся изменением модуля намагниченности, могут быть как первого, так и второго рода.

- Проведен полный анализ фазовых состояний и спектров элементарных возбуждений негейзенберговских изотропных магнетиков со значением спина $S=1, 3/2, 2$. Этот анализ позволяет утверждать, что учет высших спиновых инвариантов является существенным, и приводит к возникновению магнитоупорядоченных состояний с более сложной структурой, нежели ферро- или антиферромагнитная.

- Исследованные фазы магнетика со спином магнитного иона $S=2$ характеризуются высшими мультипольными моментами, так как средняя намагниченность на один узел равна нулю, а эллипсоид тензора квадрупольного момента вырождается в шар. Показано, что в этих состояниях возникает дополнительный параметр – псевдоспин, который при преобразованиях времени $t \rightarrow -t$ ведет себя как вектор спинового момента. Векторы псевдоспина каждой из подрешеток в антитетраэдрической фазе имеют противоположную ориентацию подобно векторам среднего спина для антиферромагнитной фазы.

- В результате анализа свободной энергии установлено, что в магнетике с $S=2$ могут реализовываться двухподрешеточные структуры с неэквивалентными подрешетками. Эти фазы характеризуются насыщенным значением среднего спина одной из подрешеток и ненасыщенностью среднего спина второй подрешетки. Причем направления магнитных моментов подрешеток либо коллинеарны, либо антиколлинеарны.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы

Научная и практическая ценность диссертационной работы определяется тем, что исследуемые модели применимы для описания сильно анизотропных магнитных материалов, магнетиков с редкоземельными ионами и актинидами, а также искусственных материалов типа моноатомных слоев и сверхрешеток, содержащих такие ионы. Некоторые результаты доведены до сравнения с экспериментом, что может быть использовано при подготовке и проведении экспериментов, интерпретации экспериментальных результатов. Описанные в работе модели могут быть использованы при моделировании и создании магнитных материалов с заранее заданными свойствами. Также полученные результаты могут быть использованы в учебных целях при подготовки специализированных курсов по физике твердого тела и теории магнетизма.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и вузах, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений, физики конденсированного состояния и проблем материаловедения, в частности, в Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского, Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина, Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Башкирском государственном университете, Челябинском государственном университете и др., как при проведении теоретических исследований, так и при планировании экспериментов.

Достоверность результатов исследования

Достоверность полученных результатов подтверждается выбором апробированных теоретических методов для решения поставленных задач диссертационной работы, обеспечивающих наиболее точный учет влияния исследуемых взаимодействий. Полученные результаты хорошо согласуются с уже известными результатами, полученными ранее в других работах, а также подтверждаются известными экспериментальными данными. Результаты, полученные из численных расчетов по аналитическим выражениям соответствуют известным данным прямого компьютерного моделирования.

Замечания по диссертации

1. Операторы Хаббарда в работе вводятся формально (на страницах 40 для значения спина $S=1$, на странице 136 для спина $S=3/2$ и на странице 282 для спина $S=2$), не указан их физический смысл, не указана полнота системы и не обсуждена алгебра этих операторов

2. Мало внимания в диссертационной работе удалено границам применимости используемых модельных систем. Также в работе недостаточно оценочных данных, которые позволили бы сравнить теоретические результаты с экспериментальными данными.

3. Вызывает вопросы использование в диссертации не устоявшихся терминов («жаргонизмов»), например, «истинный спин», «псевдоспин», «вырожденный фазовый переход первого рода», которыми автор работы пользуется без уточнения или определения их физического смысла.

4. Требует пояснения анализ свободной энергии (5.15) (стр. 297), зависящей от восьми параметров, и возможность аналитического решения довольно громоздкого дисперсионного уравнения (5.18) на странице 290.

Однако, отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость.

Общая оценка диссертационной работы

В целом диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые интересные и важные результаты. Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют целям и задачам исследования. Работа достаточно ясно изложена и достаточно хорошо

оформлена за исключением небольшого числа опечаток и стилистических неточностей. Полученные аналитические математические зависимости практически все проиллюстрированы графически. Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Исследования, проведенные в диссертационной работе, были поддержаны пятью грантами РФФИ. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, были опубликованы в 20 статьях в журналах, входящих в список ВАК Российской Федерации и научометрическую базу SCOPUS, и в 18 докладах, опубликованных в материалах конференций. Материалы диссертаций докладывались на многочисленных научных конференциях разного уровня, включая международные, и хорошо известны специалистам. Диссертационная работа полностью соответствует заявленной специальности – 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Заключение

Считаем, что диссертационная работа Космачева Олега Александровича «Спиновые нематики и сильноанизотропные магнетики» является законченной научной работой, в которой получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное направление в области теоретических исследований негейзенберговских магнетиков. По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности выводов и положений, представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Космачев Олег Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированных состояний.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором, зав. кафедрой теоретической физики Вахитовым Р.М. (специальность докторской диссертации 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), обсужден и утвержден на заседании кафедры теоретической физики Башкирского государственного университета (Протокол № 1 от 31 августа 2020 г.).

Зав. кафедрой теоретической физики
Башкирского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор
Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. З. Валиди, 32. Тел. +7(347)2299645.
E-mail: VakhitovRM@yahoo.com
Согласен на обработку персональных данных

Vakhitov

Р.М. Вахитов



Подпись *R. M. Vakhitov*

Заверяю: ученый секретарь Ученого совета
Башкирского государственного университета

Баймова

С.Р. Баймова

« 07 » сентябрь 2020 г.