

РАЗБАВЛЕННЫЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ И АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

А.С. Новак, аспирант
С.В. Сёмкин, В.П. Смагин, научные руководители

Владивостокский государственный университет
Владивосток, Россия

Аннотация. Разбавленные магнитные материалы, в которых магнитные атомы или ионы распределены в немагнитной матрице, представляют большой интерес для исследований ввиду их уникальных физических свойств и потенциальных приложений. В данном обзоре рассматриваются актуальные вопросы, связанные с изучением разбавленных ферромагнетиков и антиферромагнетиков. Основное внимание уделено теоретическим моделям, используемым для описания магнитных свойств таких систем. Подчеркивается важность дальнейших исследований в этом направлении для понимания фундаментальных основ магнетизма и развития новых функциональных материалов.

Ключевые слова: ферромагнетик, антиферромагнетик, магнитное упорядочение, модель.

DILUTE FERROMAGNETS AND ANTIFERROMAGNETS

Abstract. Dilute magnetic materials in which magnetic atoms or ions are distributed in a non-magnetic matrix are of great interest for research due to their unique physical properties and potential applications. This review examines current issues related to the study of dilute ferromagnets and antiferromagnets. The main attention is paid to the theoretical models used to describe the magnetic properties of such systems. The importance of further research in this direction for understanding the fundamental foundations of magnetism and the development of new functional materials is emphasized.

Keywords: ferromagnet, antiferromagnet, magnetic ordering, model.

Причиной фазовых переходов в магнетиках является обменное взаимодействие между электронами с незаполненными электронными оболочками в атомах магнетика. Это взаимодействие приводит к тому, что энергетически наиболее выгодной является ситуация, когда спины соседних электронов ориентированы параллельно (ферромагнетизм) или антипараллельно (антиферромагнетизм) [1].

Помимо ключевого обменного взаимодействия, на магнитные свойства веществ оказывают влияние и другие факторы:

1. Диполь-дипольное взаимодействие. Это дальнедействующее взаимодействие между магнитными диполями создает дополнительный вклад в магнитные характеристики материала.
2. Различные эффекты, связанные со структурой кристаллической или молекулярной решетки. Особенности пространственной организации атомов и молекул в веществе могут приводить к возникновению магнитной анизотропии, то есть предпочтительной ориентации магнитных моментов вдоль определенных кристаллографических направлений.

Для изучения ферромагнетиков и антиферромагнетиков используются различные теоретические модели, которые помогают понять их магнитные свойства и поведение. Вот основные модели, применяемые для этих двух типов магнитных материалов:

Основные модели для ферромагнетиков:

1. Модель Гейзенберга: Описывает энергию взаимодействия между спинами атомов или ионов. Учитывает обменное взаимодействие, которое приводит к параллельному упорядочению спинов.
2. Модель Изинга: Упрощенная версия модели Гейзенберга, где спины ограничены направлениями вверх или вниз.

3. Модель Ландау-Лифшиц-Гилберт: Описывает динамику прецессии магнитных моментов в ферромагнетике под действием магнитного поля.

Основные модели для антиферромагнетиков:

1. Модель Гейзенберга: Аналогична модели для ферромагнетиков, но с антипараллельным упорядочением спинов.

2. Модель Нееля: Описывает два подрешетки с противоположно направленными магнитными моментами.

3. Модель Ландау-Лифшица-Гилберта: Используется для описания динамики магнитных моментов в антиферромагнетиках.

Основные различия между ферромагнетиками и антиферромагнетиками:

1. Магнитное упорядочение: для ферромагнетиков характерно параллельное упорядочение спинов атомов или ионов, что обуславливает возникновение спонтанной намагниченности. В антиферромагнетиках спины атомов или ионов упорядочены антипараллельно, что приводит к нулевой суммарной намагниченности системы.

2. Температура Кюри и температура Нееля: при повышении температуры выше температуры Кюри ферромагнетик переходит в состояние материала, при котором он становится слабомагнитным. При нагревании выше температуры Нееля антиферромагнетик переходит в парамагнитное состояние (так же становится слабомагнитным).

3. Реакция на внешнее магнитное поле: ферромагнетики характеризуются сильной намагниченностью в присутствии внешнего магнитного поля. Антиферромагнетики обладают слабой намагниченностью во внешнем магнитном поле.

Термодинамические функции и фрустрационные свойства магнетиков

Термодинамические функции, такие как свободная энергия, энтропия, внутренняя энергия и теплоемкость, характеризуют равновесные свойства магнетиков.

Фрустрационные свойства магнетиков связаны с возникновением сложных, нетривиальных магнитных структур и состояний. Это происходит из-за конкурирующих взаимодействий между магнитными моментами, когда невозможно одновременно удовлетворить все обменные взаимодействия. Такие фрустрированные системы демонстрируют богатое разнообразие коллективных магнитных явлений.

Таким образом, термодинамические функции описывают магнетики в равновесном состоянии, в то время как фрустрационные свойства связаны с магнитными состояниями, которые проявляют более сложное и нестандартное поведение, возникающими из-за конкурирующих взаимодействий.

Выражение для свободной энергии и энтропии магнитной системы рассматриваются в работе [2], основанное на использовании намагниченности как функции температуры и внешнего поля:

$$\varphi(h, T) = \frac{\epsilon_p}{kT} - h + \int_h^\infty (M(\tilde{h}, T) - 1) d\tilde{h}. \quad (1)$$

Удельная энтропия s связана с удельной свободной энергией соотношением:

$$s = -\frac{\partial \varphi}{\partial T} \quad (2)$$

Используя это соотношение и равенство (1), получим:

$$\frac{s}{k} = -\frac{\partial}{\partial T} \left(T \int_h^\infty (M(\tilde{h}, T) - 1) d\tilde{h} \right), \quad (3)$$

что можно переписать следующим образом:

$$\frac{s}{k} = (1 - M(h, T))h + \int_h^\infty \left(1 - M(\tilde{h}, T) + \frac{\partial M(\tilde{h}, T)}{\partial T} \right) d\tilde{h}. \quad (4)$$

Эти формулы можно использовать для расчета свободной энергии и энтропии множества моделей магнетиков. Они применимы как к моделям Изинга и Гейзенберга чистых магнетиков, так и к их разбавленным аналогам. В случае разбавленных магнетиков, намагниченность будет зависеть не только от внешнего поля и температуры, но и от концентрации магнитных атомов.

Дополнительная характеристика магнетика – функция отношения внутренних полей

Эта характеристика отражает соотношение между различными видами внутренних магнитных полей, присутствующих в магнетике.

Функция отношения внутренних полей и ее связь со спонтанной намагниченностью рассматривается в работе [3], и объясняет, если известно точное или приближенное значение спонтанной намагниченности как функции температуры $M = M(x)$, то, находя обратную функцию $x = x(M)$, можно найти соответствующую этому точному или приближенному значению зависимость $y(M)$, и, наоборот, если из каких-либо соображений известна функция $y(M)$, то можно найти соответствующую этой функции зависимость $M(x)$.

Разбавленные магнетики:

1. Разбавленные ферромагнетики: в данных ферромагнетиках наблюдается конкуренция между, прямым и обменным взаимодействием магнитных моментов, и косвенным РККУ-взаимодействием, которое возникает благодаря проводящим носителям заряда. Это происходит в результате разбавления ферромагнитной матрицы немагнитными примесями или дефектами. Это противоборство различных магнитных взаимодействий приводит к возникновению сложных, неоднородных магнитных состояний, таких как спиновое стекло, кластерное стекло или суперпарамагнетизм. В этих состояниях магнитные моменты демонстрируют фрустрированное, замороженное поведение, не образуя дальнего магнитного порядка, характерного для чистых ферромагнетиков. Вместо этого формируются кластеры или случайно ориентированные магнитные моменты.

2. Разбавленные антиферромагнетики: антиферромагнитная матрица разбавлена немагнитными примесями. В разбавленных антиферромагнетиках наблюдается противостояние между антиферромагнитным обменным взаимодействием и нарушениями магнитной структуры, вызванными примесями и дефектами. Это соперничество различных магнитных эффектов приводит к возникновению фрустрации и формированию сложных, неоднородных магнитных конфигураций в таких системах. В результате этого конфликта взаимодействий разбавленные антиферромагнетики демонстрируют богатые фазовые диаграммы, а также интересные квантовые критические явления, где магнитные состояния претерпевают фазовые переходы. Изучение этих разбавленных антиферромагнитных материалов имеет важное значение для понимания механизмов высокотемпературной сверхпроводимости, поскольку они тесно связаны с купратными сверхпроводниками и другими сильно коррелированными электронными системами.

Приближение Бете для чистого и разбавленного магнетика как усреднение по локальным обменным полям

Рассматриваемое в работе [4] приближение базируется на хорошо зарекомендовавших себя методах, но при этом предоставляет большую вариативность за счет использования различных форм распределения обменных полей.

Анализируемое в данной работе приближение, при его применении к разбавленным магнетикам, демонстрирует более точные результаты в отношении: перколяционных порогов, концентрационных зависимостей температуры Кюри, концентрационных зависимостей спонтанной намагниченности.

Структура этого подхода позволяет строить различные варианты его обобщения для описания разбавленных магнитных систем. Например, в рамках этого приближения можно учесть различие в корреляции спинов между атомами, которые связаны обменным взаимодействием, и атомами, которые не связаны.

Корреляционные функции чистого и разбавленного магнетика в приближении эффективного поля

В предыдущих публикациях [1] авторами была предложена классификация самосогласованных методов для вычисления намагниченности и определения критических точек в чистых и разбавленных магнетиках. Однако в этих работах не рассматривался вопрос о расчете спиновых корреляционных функций и их поведении вблизи критической точки.

Тем не менее, как будет показано далее, некоторые из методов, описанных в работе [5], могут быть также использованы для расчета спиновых корреляций в магнитных системах. Таким образом, данная работа расширяет область применения ранее предложенных самосогласованных подходов, демонстрируя возможность их использования не только для расчета намагниченности, но и для моделирования спиновых корреляций вблизи фазовых переходов в магнетиках.

Корреляция (рис. 1):

$$g_{12} = \text{th}K + \frac{1 - \sqrt{1 - \exp(-4K)}M^2}{\text{sh}2K} - M^2 \quad (5)$$

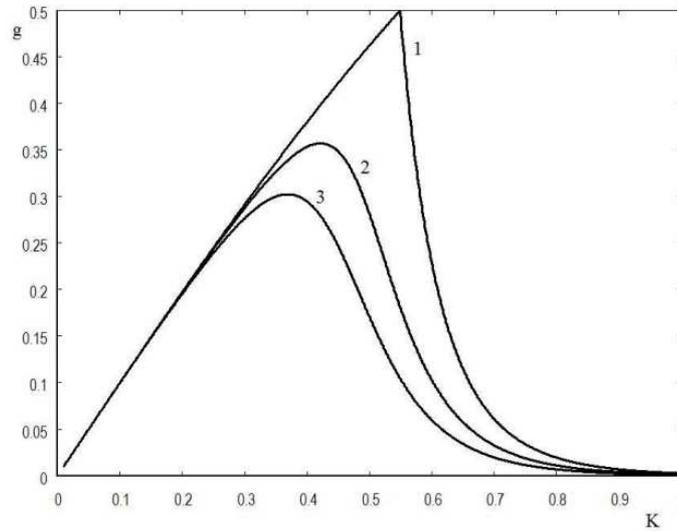


Рис. 1. Корреляция g_{12} как функция параметра $K = J / kT$ при различных значениях внешнего поля:

$$1 - H_{ex} = 0; 2 - H_{ex} = 0,1; 3 - H_{ex} = 0,2$$

При отсутствии внешнего магнитного поля в области температур $K < K_c$

$$g_{12}(p) = p g_{12}(1) = b \text{th}K \quad (6)$$

При $K > K_c$ зависимость g_{12} от b более сложная (рис. 2).

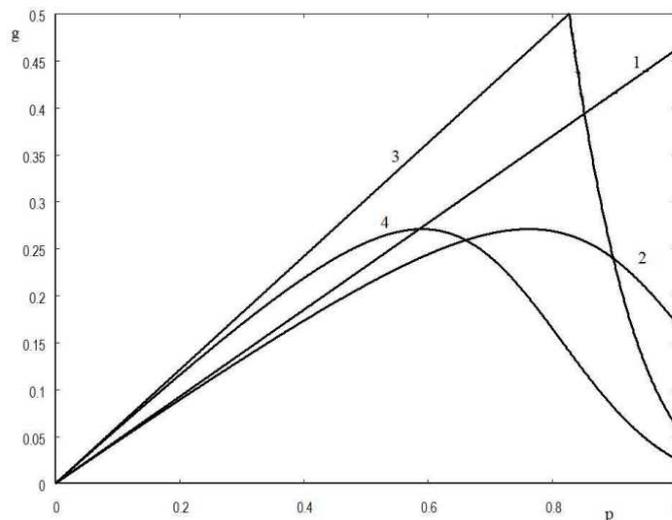


Рис. 2. Корреляция g_{12} как функция концентрации магнитных связей b при различных K и H_{ex} :

$$1 - K = 0,5, H_{ex} = 0; 2 - K = 0,5, H_{ex} = 0,05; 3 - K = 0,7, H_{ex} = 0; 4 - K = 0,7, H_{ex} = 0,07$$

Таким образом, в рамках приближения эффективного поля был исследован изинговский магнетик – как чистый, так и с разбавлением по связям.

Таким образом, данный подход объединяет в себе преимущества приближения Бете, а именно, самосогласованность и относительная простота, с возможностью исследования спи-

новых корреляций, что делает его привлекательным инструментом для теоретического описания магнитных свойств этого класса систем.

Несмотря на то, что при фазовом переходе корреляционная длина демонстрирует пиковое поведение, она не расходится, а сохраняет конечное значение. Это отличает данный подход от некоторых других приближений, в которых корреляционная длина расходится в критической точке.

1. Семкин С.В., Смагин В.П. Приближенные методы в теории чистых и разбавленных магнетиков: монография. – Владивосток, 2019. – 220 с.

2. Семкин С.В., Смагин В.П. Термодинамические функции и фрустрационные свойства магнетиков // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 158–165.

3. Семкин С.В., Смагин В.П. Дополнительная характеристика магнетика – функция отношения внутренних полей // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 148–156.

4. Семкин С.В., Смагин В.П. Приближение Бете для чистого и разбавленного магнетика как усреднение по локальным обменным полям // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019. – Т. 62, № 1. С. 153–158.

УДК 327.5 + 338.27

ОСНОВНЫЕ ПРИОРИТЕТЫ РАЗВИТИЯ РОССИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ ПОВЕСТКИ

И.В. Павлов, магистрант

Р.И. Гриванов, канд. полит. наук, доцент

*Владивостокский государственный университет
Владивосток, Россия*

Аннотация. В целях эффективного решения задач в области защиты интересов РФ по всем стратегически важным направлениям были сформированы и определены основные приоритеты развития на ближайшее десятилетие. В первую очередь это развитие таких направлений, как: создание комфортной инфраструктуры, переход на цифровые сервисы, создание инновационных технологий в области медицины, космоса, военной промышленности, образования и др.

Ключевые слова: приоритеты развития, национальная безопасность, политический кризис, санкции, цифровизация.

THE MAIN PRIORITIES OF RUSSIA'S DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF THE MODERN INTERNATIONAL AGENDA

Abstract. In order to effectively solve problems in the field of protecting the interests of the Russian Federation in all strategically important areas, the main development priorities for the next decade were formed and defined. First of all, this is the development of such areas as: the creation of a comfortable infrastructure, the transition to digital services, the creation of innovative technologies in the field of medicine, space, military industry, education, etc.

Keyword: development priorities, national security, political crisis, sanctions, digitalization.

Произошедшие в 2022 г. изменения внешних и внутренних экономических и геополитических условий стали достаточно серьезными, чтобы запустить в России масштабные процессы структурных изменений и задать тренд на самообеспечение и самодостаточность. Президентом страны своевременно до 2014 г. была поставлена задача перед Правительством РФ о необходимости разработки предупредительных мер, направленных на защиту внутреннего рынка страны, национальной платежной системы, а также повсеместно распространялась концепция политики импортозамещения. Планомерная, но в то же время оперативная работа всех министерств и ведомств позволила России в очень короткие сроки перенаправить и развить