Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. И. Лесных, Свойства спиновых стекол и моделирующих их систем как неупорядоченных магнетиков, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2005, выпуск 38, 85–90

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu377>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.209.52.79

26 апреля 2023 г., 13:21:32

**СВОЙСТВА СПИНОВЫХ СТЕКОЛ И МОДЕЛИРУЮЩИХ ИХ СИСТЕМ
КАК НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ МАГНЕТИКОВ**

Изложена физика спин-стекольного состояния, дающая качественное представление о том, что происходит в неупорядоченных магнетиках со случайными взаимодействиями. Показано, что ниже определенной температуры магнитная восприимчивость образца зависит от его предыстории. Изотермическая намагниченность является необратимой, а термостатическая — обратимой. Установлено, что термостатическая восприимчивость почти не зависит от температуры ниже T_g . Необратимость восприимчивости наблюдается во всех спиновых стеклах и является одним из главных критериев перехода системы в состояние спинового стекла, а T_g считается температурой перехода в это состояние.

Исследования показали, что на электропроводимость оказывают влияние различные примеси. Как это часто бывает, спиновые стекла открыли, исследуя другие явления — влияние примесей на электропроводимость металлов. Среди прочих явлений изучалось влияние и магнитных примесей, например, воздействие небольших присадок марганца на свойства меди, и при этом было обнаружено, что магнитные примеси в металле представляют собой магнетик с удивительными свойствами. Оказалось, что ориентации примесных спинов в основном состоянии, то есть при абсолютном нуле температуры, не имеют никакой пространственной периодичности; ориентация меняется в пространстве случайным образом подобно тому, как случайно расположены атомы в стекле. Поэтому такие магнетики были названы спиновыми стеклами.

Спиновыми стеклами называют неупорядоченные магнетики, в которых энергия обменного взаимодействия случайным образом меняет не только величину, но и знак. В таких системах с конкурирующими взаимодействиями, в отличие от обычных магнетиков, с понижением температуры дальнего магнитного порядка не возникает. Но не происходит и медленного постепенного замораживания спинов. Ниже некоторой достаточно хорошо фиксируемой в эксперименте температуры магнетик переходит в новое состояние, не имеющее аналогов в упорядоченных системах. Характерным свойством этого состояния является чрезвычайно медленная релаксация. Типичные времена установления равновесия, во всяком случае, превосходят $10^4 - 10^5$ с. Одновременно наблюдаются явления необратимости статических свойств [1].

Так как энергия обменного взаимодействия сильно зависит от расположения магнитных и немагнитных атомов, то в классе неупорядоченных магнетиков большинство веществ принадлежит к спиновым стеклам. В настоящее время известно огромное число спиновых стекол — металлов, диэлектриков и полупроводников; разбавленных сплавов (т. е. с малой концентрацией магнитных атомов) и концентрированных; кристаллических и аморфных веществ.

При изучении анизотропии в спиновых стеклах было обнаружено то, что если оси анизотропии случайно ориентированы в пространстве, то сколь угодно малая анизотропия разрушает магнитный порядок: магнетик разбивается на области, моменты которых случайно ориентированы друг относительно друга. При этом происходит выигрыш в энергии анизотропии, который превосходит проигрыш в обменной энергии. Дальний порядок может быть стабилизирован внешним магнитным полем или постоянной по направлению магнитной анизотропией. Неустойчивость дальнего порядка является следствием своеобразной симметрии: магнетик макроскопически изотропен, но анизотропен локально. Неустойчивость дальнего порядка может быть вызвана не только случайной анизотропией, но и другими случайными возмущениями, не сохраняющими полный спин системы, например, диполь — дипольными взаимодействиями, случайной анизотропией обмена.

В соответствии с этим, достаточно сильные флуктуации обменного взаимодействия или направлений осей одноионной анизотропии приводят к возникновению спинового стекла. Случайное магнитное поле, подобно случайной анизотропии, может приводить к разрушению дальнего порядка.

Дипольное спиновое стекло может возникнуть в диэлектриках с малой концентрацией магнитных атомов и дипольное стекло может быть не только магнитным, но и электрическим. Имеется несколько ориентаций диполя, в которых его энергия взаимодействия с решеткой ми-

нимальна. Между различными эквивалентными положениями возможны туннельные переходы. Взаимодействие диполей обуславливает переход такой системы в состояние дипольного стекла, в котором диполи хаотически ориентированы вдоль одного из направлений с минимальной энергией взаимодействия с решеткой. Этот переход наблюдался в кристаллах, содержащих доли процента дипольных примесей при температурах порядка 1–3 К [2].

Представим себе систему магнитных стрелок, экранированных от магнитного поля Земли и случайным образом размещенных в пространстве. Допустим, что стрелки могут вращаться без трения вокруг закрепленных осей. Если расстояние между стрелками велико по сравнению с их размерами, то стрелки взаимодействуют как магнитные диполи, то есть величина энергии убывает с ростом расстояния между диполями, как r^3 , а знак ее может быть (+) или (–) в зависимости от углов между стрелками и соединяющей их прямой. Так как стрелки расположены случайно, то и величина, и знак их взаимодействия являются случайными, иными словами на каждую стрелку со стороны других стрелок действуют силы, величина и направление которых хаотичны в той же мере, в какой хаотичны силы, действующие на молекулы газа. Ответ на вопрос: Как в этом случае ориентируются стрелки? не прост и до сих пор нет строгого решения этой проблемы, но качественно картину понять можно.

При случайном расположении стрелок все направления прямых, соединяющих пары стрелок, равновероятны, а потому при фиксированном направлении стрелок равновероятны положительные и отрицательные взаимодействия. Но тогда стрелки должны ориентироваться хаотично, то есть система стрелок представляет собой дипольное стекло. Остается теперь заменить свободно вращающиеся стрелки магнитными моментами случайно расположенных атомов, и мы приходим к картине дипольного спинового стекла. В твердом теле дипольное спиновое стекло образуется, когда энергия магнитного дипольного взаимодействия больше обменной энергии. Такая ситуация должна возникнуть в диэлектриках с малой концентрацией магнитных атомов, так как обменное взаимодействие падает с увеличением расстояния между спинами быстрее диполь – дипольного [2].

Объекты и методы исследования. Классическими (и первыми экспериментально исследованными) спиновыми стеклами являются разбавленные сплавы типа CuMn и AuFe. Обменное взаимодействие спинов переходных металлов осуществляется через электроны проводимости. Например, при легировании ферромагнетика EuS немагнитным стронцием, который замещает серу в узлах решетки, ферромагнитный порядок разрушается и возникает спиновое стекло. Это происходит при атомной концентрации стронция порядка 0,5. Ферромагнитный порядок в EuS обусловлен косвенным обменом спинов европия через атомы серы. Взаимодействие ближайших соседей в решетке является ферромагнитным, взаимодействие в следующей координационной сфере антиферромагнитно, а в чистом EuS — ферромагнитный обмен преобладает. При замене атомов европия немагнитными атомами стронция число магнитных соседей (ближайших и следующих за ближайшими) становится случайной величиной. Соответственно случайным является и распределение ферро- и антиферромагнитных связей, и при достаточно большой концентрации стронция конкуренция взаимодействий разных знаков приводит к спиновому стеклу [1].

Ряд работ был посвящен попыткам обнаружить спиновые волны в спиновых стеклах. Наиболее подробно исследовались сплавы $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$, которые в определенном интервале температур и концентраций находятся в состоянии спинового стекла. Результат этих работ отрицателен — спиновые волны обнаружены не были.

Во многих экспериментальных работах делались попытки установить зависимость от магнитного поля некоторой характерной температуры, которая в том или ином смысле характеризовала бы переход в состояние спинового стекла [3].

Изучение магнитных свойств сплавов переменного состава при различных температурах показало, что состояние спинового стекла присуще не только недавно полученным веществам (скажем, аморфным), но и многим давно и хорошо известным; например сплавам, близким по составу к нержавеющей стали и нихрому.

В сплавах (рис. 1) с содержанием никеля 14–24% восприимчивость при низких температурах $T \approx 20 - 30 \text{ K}$ имеет излом, характерный для перехода в спиновое стекло. В сплавах же с концентрацией никеля, большей 24%, восприимчивость ведет себя как при фазовом переходе парамагнетик – ферромагнетик. При более низких температурах, порядка 20–30 К, зависимость восприимчивости от температуры снова резко меняется: она быстро уменьшается, и ее значе-

ние приближается к значениям восприимчивости в сплавах с содержанием никеля меньше 24%, которые при этих температурах находятся в состоянии спинового стекла. Резкий спад восприимчивости объясняется тем, что сплав из ферромагнитного состояния переходит в состояние спинового стекла.

Рис. 1. Восприимчивость сплавов $\text{Fe}_{82-x}\text{Ni}_x\text{Cr}_{18}$:
кривая 1 — содержание никеля x — 14% по массе; 2 — 16, 3 — 18, 4 — 20, 5 — 22, 6 — 24,
7 — 26, 8 — 28, 9 — 30, 10 — 32

Результаты эксперимента и их обсуждение. Большое число экспериментальных исследований, проведенных за последние 10 лет, показали, что все спиновые стекла независимо от их типа характеризуются некоторым набором свойств, отличающих их от обычных магнетиков. Уже в ранних работах было обнаружено, что часть восприимчивости спиновых стекол зависит от частоты. При приложении магнитного поля к образцу, охлажденному до $T < T_g$ без поля, намагниченность сначала скачком (за микроскопические времена) увеличивается, а затем медленно растет, приближаясь к равновесному значению по закону, близкому к логарифмическому (или степенному с малым показателем степени), за времена вплоть до времен порядка часов или даже суток. Наоборот, если образец охлажден в поле до $T < T_g$, то после выключения поля намагниченность сначала падает скачком, а затем медленно уменьшается, оставаясь конечной даже через время $t \approx 10^5$ с. Эти особенности динамики спиновых стекол, как и необратимость статической восприимчивости, показывают, что в спиновых стеклах имеется широкий спектр времен релаксации, который простирается до макроскопических времен $t \approx 10^5$ с, а возможно, и больше — никаких ограничений сверху на длительность релаксации пока не получено.

Поглощение на низких частотах и необратимость статической восприимчивости наводят на мысль, что основное состояние спиновых стекол при $T < T_g$ вырождено или квазивырождено.

Явление старения в спиновых стеклах известно уже довольно давно. Оно демонстрирует отсутствие истинного термодинамического равновесия в спиновых стеклах. Обратимость статической восприимчивости, измеренной охлаждением в поле, наводит на мысль, что состояние, полученное таким способом, является равновесным. Так и считали до 1983 г., когда было показано, что релаксация намагниченности после выключения поля зависит от времени t_W , в течение которого система находится в магнитном поле при данной температуре $T < T_g$, хотя до выключения поля намагниченность от времени не зависит.

Зависимость скорости релаксации от времени ожидания t_W прослежена до $t_W \sim 10^5$ с. Таким образом, в состоянии, полученном охлаждением в поле, происходят долговременные процессы установления равновесия, не меняющие значения намагниченности [4].

Аналогичные эффекты памяти наблюдались и в состоянии, полученном охлаждением в нулевом поле: процесс установления равновесной намагниченности после включения поля при $T < T_g$ зависит от времени ожидания до включения поля.

Во многих экспериментальных работах было показано, что с понижением температуры переход в спиновое стекло возможен не только из парамагнитного состояния, но и из магнитоупорядоченного, ферро- или антиферромагнитного. Такой переход часто называют возвратным.

Изучение спиновых стекол началось после опубликования работы Капеллы и Мидоша. В этой работе было впервые обнаружено, что восприимчивость спинового стекла (изучался сплав AuFe) в слабом магнитном поле имеет излом при некоторой температуре (рис. 2).

Р и с. 2. Зависимость восприимчивости сплава $\text{Au}_{98}\text{Fe}_2$ от температуры в различных магнитных полях:

сплошная кривая — магнитное поле 5 Гс, светлые кружки — 100 Гс, штриховая кривая — 200 Гс, жирные точки — 300 Гс

Р и с. 3. Восприимчивость сплава $(\text{La}_{1-x}\text{Cd}_x)\text{Al}_2$, $x = 0,6$ ат. % при различных частотах переменного магнитного поля в 0,1 Э: кривая 2 — 7,2; 3 — 17,2; 4 — 237; 5 — 1142 Гц. Кривая 1 получена измерением восприимчивости через 40 с после включения постоянного магнитного поля, что соответствует частоте 0,02 Гц

Излом размывается уже в слабых магнитных полях; достаточно приложить поле в 100 Гс, чтобы излом превратился в плавный максимум. Излом на кривой восприимчивости $\chi(T)$ наблюдается и в других спиновых стеклах, и это навело на мысль, что в системах с конкурирующим магнитным взаимодействием имеется фазовый переход из парамагнитного состояния в состояние спинового стекла [5].

Зависимость температуры излома от времени измерения (рис. 3), которая проявляется при макроскопически больших временах, свидетельствует о том, что в спиновом стекле имеют место чрезвычайно медленные процессы установления равновесия. Еще более наглядно об этом говорят типичные для спинового стекла процессы магнитной вязкости.

Иногда магнитную вязкость в спиновых стеклах объясняют, исходя из аналогии с горными породами, в которых это явление давно и хорошо известно. В магнитном отношении горные породы представляют собой набор хаотически ориентированных ферромагнитных областей. Переориентации момента в каждой области при приложении магнитного поля препятствует коэрцитивная сила; это означает, что для переориентации моментов отдельных областей требуется преодоление энергетического барьера, причем время, за которое происходит термическая активация момента через барьер высотой E , пропорционально $\exp(E/T)$. Это и является причиной магнитной вязкости в этих веществах. Однако спиновое стекло — однородное вещество, в котором нет выделенных областей. Поэтому аналогия с горными породами носит поверхностный характер и никак не может объяснить магнитную вязкость в спиновых стеклах. Магнитная вязкость свидетельствует о том, что в спиновых стеклах существует большое число вырожденных или метастабильных состояний, разделенных барьерами. Макроскопические времена релаксации свидетельствуют о том, что барьеры при достаточно низких температурах практически бесконечны, т.е. спиновое стекло является неэргодической системой [6]. Вопрос о структуре основного состояния спиновых стекол — один из главных вопросов, на который должна

ответить теория. К картине вырожденных основных состояний в спиновых стеклах приводит и температурная зависимость теплоемкости.

При низких температурах теплоемкость пропорциональна T . Это обстоятельство известно из самых первых экспериментов, посвященных разбавленным сплавам типа CuMn, и всегда вызывало недоумение, так как коллективные возбуждения такую зависимость дать не могут. Линейная теплоемкость при низких температурах наблюдается не только в спиновых стеклах, но и в обычных стеклах. Объяснение этой зависимости для обычных стекол состоит в том, что имеются атомы или группы атомов, потенциальная энергия которых как функция положения имеет вид двух ям, разделенных барьером. Вследствие случайного атомного потенциала в стекле возможно возникновение состояний с близкой потенциальной энергией. Эти состояния могут быть связаны не с уровнями отдельных атомов или небольших групп атомов, а с переходами между различными метастабильными состояниями спинового стекла, которые отличаются ориентацией большого числа спинов.

До сих пор мы говорили о спиновых стеклах, в которых концентрации положительных и отрицательных связей примерно одинаковы. Очевидно, что если при фиксированной температуре увеличивать концентрацию ферромагнитных связей, то образец, в конце концов, перейдет из состояния спинового стекла в ферромагнитное состояние. Концентрация ферромагнитных связей, при которой происходит переход, зависит, вообще говоря, от температуры, так что для сложных сплавов, в которых концентрация положительных и отрицательных связей зависит от состава, можно говорить о фазовой диаграмме температура – состав.

Исходя из полученных ранее данных можно нарисовать фазовую диаграмму сплавов $\text{Fe}_{82-x}\text{Ni}_x\text{Cr}_{18}$ показанную на рис. 4.

Аналогичные фазовые диаграммы наблюдались и в других концентрированных спиновых стеклах, в частности, в $\text{Eu}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S}$ (рис. 5).

Чрезвычайно интересно поведение этих сплавов в области, справа от тройной точки. С понижением температуры при фиксированной концентрации x имеют место два фазовых перехода: сначала из пара- в ферромагнитную фазу, а затем из ферромагнитной фазы в спиновое стекло. Это явление наблюдалось также в ряде аморфных спиновых стекол, в сплавах $\text{Pd}_{1-x}\text{Mn}_x$ с $x > 4$ ат. % и других.

Рис. 4. Фазовая диаграмма сплава $\text{Fe}_{82-x}\text{Ni}_x\text{Cr}_{18}$: область 1 — парамагнитная фаза; 2 — ферромагнитная фаза; 3 — состояние спинового стекла

Рис. 5. Фазовые диаграммы неупорядоченных растворов $\text{Eu}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S}$ (а) и $\text{Fe}_x\text{Mg}_{1-x}\text{Cl}_2$ (б):

P — парамагнитная фаза; F, AF — соответственно ферро- и антиферромагнитная фазы; SG — состояние спинового стекла

Выводы. Ферромагнитная фаза вблизи линии концентрационного перехода ферромагнетик – спиновое стекло уже обладает многими свойствами, характерными для спиновых стекол. Хотя момент в этой фазе отличен от нуля, но благодаря большому числу антиферромагнитных связей имеются области, в которых спины ориентированы под углом к моменту. Локальные

возбуждения в этих областях могут описываться на языке двухуровневых систем. Поэтому в таком ферромагнетике наблюдается аномально большая теплоемкость.

Уже очень простые магнитные измерения показывают, что ниже определенной температуры T_g магнитная восприимчивость образца зависит от его предыстории: охлаждение в магнитном поле и включение поля после охлаждения до температур ниже T_g приводит к разным значениям магнитного момента. Изотермическая намагниченность M_{ZFC} , полученная охлаждением в нулевом поле, является необратимой, а термостатическая M_{FC} (охлаждением в поле) обратима. Термостатическая восприимчивость, как правило, почти не зависит от температуры ниже T_g . Необратимость восприимчивости наблюдается во всех спиновых стеклах и является одним из главных и наиболее простых критериев перехода системы в состояние спинового стекла, а T_g считается температурой перехода в это состояние.

Во внешнем магнитном поле необратимость восприимчивости сохраняется, но начинается она при меньших температурах, причем поля всего в сотни гаусс сдвигают T_g на большую величину, порядка градуса.

Физика спин-стекольного состояния, изложенная в настоящей работе, это качественное представление того, что происходит в неупорядоченных магнетиках со случайными взаимодействиями, и автором сделана попытка построить теорию спиновых стекол, которая описывала бы реальные спиновые стекла и моделирующие их системы.

Обозначенные исследования имеют большое политехническое значение; раскрывают основные направления научно-технического прогресса в области новых магнитных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коренблит И. Я., Шендер Е. Ф. Спиновые стекла // Известия высших учебных заведений. Физика, 1984. № 10. С. 23–30.
2. Белозерова Т. С., Хеннер Е. К. Дипольные спиновые стекла // Физика твердого тела, 1984. Т. 26, вып. 1. С. 83–88.
3. Коренблит И. Я., Шендер Е. Ф. Спиновые стекла и неэргодичность // Успехи физических наук, 1989. Т. 157, вып. 2. С. 267–270.
4. Сабурова Р. В., Чугунова Г. П. Релаксационная динамика изинговского спинового стекла в поперечном поле // Изв. РАН. Физика твердого тела, 1994. Т. 36, вып. 12. С. 351.
5. Зайцев И. А., Минаков А. А., Галонзка Р. Р. Релаксация намагниченности в спиновых стеклах выше температуры перехода // Изв. РАН Физика твердого тела. 1988. Том 30. вып. 7. С. 220.
6. Доценко В. С. Физика спин-стекольного состояния // Успехи физических наук, 1993. Т. 163, вып. 6. С. 18.

Поступила 11.02.2005 г.
После переработки 22.06.2005 г.

УДК 541.138.3

И. С. Ясников

РЕЛАКСАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ПОЛЕЙ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕНТАГОНАЛЬНЫХ МИКРОТРУБКАХ В ПРОЦЕССЕ ИХ РОСТА ПРИ ЭЛЕКТРОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕДИ

В работе термодинамически обосновано наблюдаемое в экспериментах образование перемычек, возникающих перпендикулярно граням внутренней полости пентагональных микротрубок, выросших до определённых размеров в процессе электрокристаллизации меди, а также последующее преобразование микротрубок в монокристаллы. Образование перемычек в растущих пентагональных микротрубках описывается в рамках линейного приближения термодинамики неравновесных процессов и может трактоваться как возможный канал релаксации внутренних полей упругих напряжений в пентагональных микротрубках для сохранения пятерной симметрии в процессе их роста.

Проведённые автором эксперименты по электроосаждению меди выявили многообразие форм роста образующихся пентагональных кристаллов при варьировании параметров, управляющих процессом электроосаждения. При этом среди наблюдаемых форм роста пентагональных кристаллов были выявлены кристаллы в виде пентагональных призм, как без полости (рис. 1, а), так и с полостью внутри (рис. 1, б)