

БЕСПОРЯДОК В МАГНИТНОМ МИРЕ

Доктор физико-математических наук
И. КОРЕНБЛИТ.

доктор физико-математических наук
Е. ШЕНДЕР



Если бы еще лет пятнадцать назад спросить специалистов в любой области науки и техники, есть ли какая-либо связь между магнитными свойствами нержавеющей стали, с одной стороны, и оптимальным расположением блоков в компьютере, составлением наилучшего маршрута для путешественника, работой мозга при распознавании образов... — с другой, то специалисты очень удивились бы и ответили отрицательно. Действительно, что же может быть общего между такими, казалось бы, совершенно разными вещами? Конечно, ни компьютер, ни экипаж для путешествия без стали не сделаешь, но ведь не в этом же дело!

Оказывается, несмотря на все внешнее различие, решение проблем, о которых мы упомянули, основано на одних и тех же идеях и принципах. Поэтому физические явления, происходящие в нержавеющей стали и похожих материалах, моделируют и способ распределения блоков в компью-

терах, и составление маршрута для путешественника.

Когда физики начали исследовать эти явления, они и не подозревали об их связи с таким широким кругом проблем. Интересным казалось то, что в большом количестве твердых тел самого разного состава магнитные явления по непонятным причинам протекают совсем не «по правилам», т. е. не так, как следовало ожидать, исходя из всего предыдущего опыта и накопленных знаний. О каких «правилах» идет речь?

Постоянные магниты есть в любой школьной лаборатории. Вещества, из которых они сделаны, называют ферромагнетиками, потому что первым магнитом, с которым познакомилось человечество, было железо (лат. *fer-um*). Атомы этих веществ представляют из себя элементарные магнитики. Про такие атомы говорят, что они обладают магнитным моментом. Одновременно они обладают и механическим вращательным моментом —

спином. Спин атома можно представить схематично в виде стрелочки. Его происхождение связано со свойствами электронов и структурой электронной оболочки атомов.

Мы не будем сейчас обсуждать вопрос, почему атомы одних веществ имеют спин, а других — нет. Речь пойдет только о веществах, у атомов которых спин есть. Магнитные свойства таких веществ определяются взаимной ориентацией спинов разных атомов, которая зависит от взаимодействия между спинами. Спины стремятся ориентироваться так, чтобы потенциальная энергия, связанная с их взаимодействием, была минимальной. В некоторых веществах взаимодействие ориентирует спины параллельно (это взаимодействие мы будем называть положительным), в других веществах — антипараллельно (такое взаимодействие — отрицательным). В то же время магнитные стрелки испытывают беспорядочные тепловые колебания подобно тому, как колеблются атомы в твердых телах или беспорядочно движутся атомы в газах. Тепловые колебания мешают ориентации спинов, поэтому при высоких температурах, когда эти колебания сильные, спины не имеют определенной ориентации.

Для каждого магнитного вещества есть своя температура (ее называют температурой Кюри), ниже которой устанавливается вполне определенная взаимная ориентация спинов. Если взаимодействие положительно, то спины ориентируются параллельно. В результате сложения магнитных моментов атомов все вещество в целом приобретает магнитный момент (рис. 1, а). Такие вещества и называют ферромагнетиками. Если взаимодействие спинов отрицательно, то в простейших случаях возникает шахматный порядок в ориентации спинов (рис. 1, б). Такие вещества не обладают магнитным моментом и называются антиферромагнетиками.

До недавнего времени исследовались, в основном, магнитные кристаллы, т. е. вещества, в которых магнитные атомы образуют регулярные

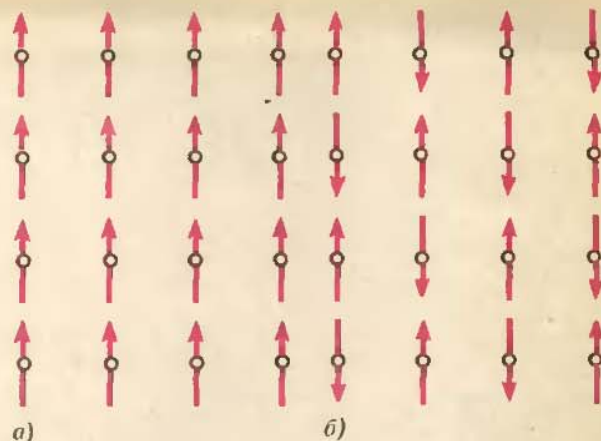


Рис. 1. Ориентация спинов: а) в кристаллическом ферромагнетике, б) в антиферромагнетике. Круги изображают атомы, стрелки — спины.

периодические структуры. Они, например, могут занимать места в вершинах периодически повторяющихся кубов или в вершинах и центрах граничных кубов.

В реально существующих магнитных кристаллах спиновые структуры бывают гораздо сложнее, чем изображенные на рисунке 1. Например, магнитные моменты разных атомов могут не быть направленными вдоль одной прямой, а меняться регулярным образом от атома к атому. Существование таких структур связано с тем, что энергии взаимодействия различных групп спинов — например, спинов, расположенных вдоль ребра куба и вдоль пространственной диагонали, — имеют разную величину и знак. Однако, за исключением некоторых очень специальных случаев, всегда существует одна спиновая конфигурация, соответствующая минимуму потенциальной энергии всей системы. Как бы ни была сложна эта спиновая конфигурация, в кристалле всегда можно выделить сравнительно небольшую группу спинов — которая называется элементарной магнитной ячейкой — и, перенося ее параллельно самой себе, получить всю магнитную структуру кристалла. Выделение элементарной ячейки аналогично тому, как для построения графика периодической функции $y = \cos x$ достаточно построить ее в интервале



Рис. 2. Хаотичная ориентация спинов в спиновом стекле.

$0 \leq x \leq 2\pi$, а затем параллельно переносить построенный на этом интервале график.

Ну а какая спиновая конфигурация возникнет, если магнитные атомы не образуют правильной кристаллической решетки? Такой вопрос возник в связи с развитием техники. Появились новые, широко используемые в технике материалы, так называемые металлические стекла, в которых все атомы, включая магнитные, расположены в беспорядке, как атомы в обычном стекле. (О металлических стеклах уже рассказывалось в «Кванте» № 11 за 1986 г.) Да и во многих давно известных сплавах (нержавеющая сталь, нихром и т. д.) атомы разных элементов хоть и занимают узлы кристаллической решетки, но распределены по этим узлам случайным образом, так что периодической структуры не образуют.

Случайное распределение атомов приводит к тому, что величина и знак энергии взаимодействия спинов также случайны. Хаотичными оказываются и ориентации спинов, соответствующие минимуму суммарной потенциальной энергии взаимодействия спинов (рис. 2). По этой причине такие вещества называют спиновыми стеклами. Вследствие хаотической ориентации спинов суммарный магнитный момент в спиновом стекле равен нулю. Хаотическая ориентация

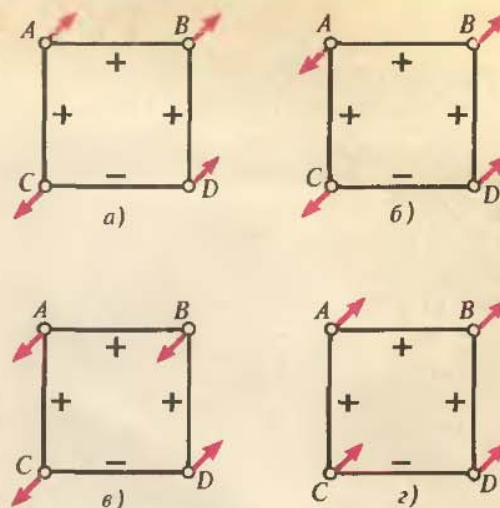


Рис. 3. Возможные направления спинов четырех атомов, расположенных по углам квадрата. Знаки энергий взаимодействия указаны на сторонах квадрата.

спинов возникает ниже некоторой температуры, характерной для каждого вещества, аналогично тому, как возникает магнитный момент в ферромагнетике.

Очень важное отличие спиновых стекол от магнитных кристаллов заключается в том, что в них имеется очень много наборов ориентаций спинов, соответствующих одной и той же минимальной полной энергии. Мы поясним это на примере четверки спинов, изображенной на рисунке 3. Будем считать, что взаимодействуют только спины, расположенные в ближайших вершинах квадрата, причем все четыре энергии взаимодействия одинаковы по абсолютной величине, но три из них положительны, а одна — между спинами в вершинах C и D — отрицательна. Кроме того, мы для наглядности будем рассматривать наиболее простые спиновые конфигурации, когда все магнитные моменты направлены вдоль какой-то оси. Тогда сразу видно, что невозможно ориентировать спины так, чтобы в каждой паре взаимная ориентация спинов соответствовала взаимодействию между ними. Например, если спины C и D , в соответствии с их энергией взаимодействия, антипараллельны, то в одной из других пар спинов взаимная ориентация тоже должна быть антипараллельной, хотя взаимодействие в этой паре положительно (см.



Рис. 4. Рельеф потенциальной энергии: а) в упорядоченных магнетиках, б) в спиновом стекле.

рис. 3, а—в). Если же во всех парах с положительной энергией спины параллельны, то параллельными оказываются отрицательно взаимодействующие спины *C* и *D* (см. рис. 3, г).

Таким образом, для одной из пар — или, как говорят, на одной из связей — ориентация спинов не соответствует минимуму парной энергии, хотя суммарная энергия всей четверки является минимально возможной. Такую связь называют фрустрированной (от английского слова *frustration* — разочарование). Все четыре рисунка, соответствующие разным положениям фрустрированной связи и поэтому разным наборам ориентаций спинов, дают одну и ту же суммарную энергию. Подчеркнем еще раз, что если все четыре энергии одного знака, то минимуму полной энергии соответствует только одна спиновая конфигурация из изображенных на рисунке 1.

Полушутя-полусерьезно задачу о нахождении равновесного состояния спиновых стекол можно уподобить задаче формирования по возможности дружного коллектива из претендентов, у которых непростые отношения друг с другом: кого ни выбирай, всегда в коллективе будут не симпатизирующие друг другу люди.

Наборы ориентаций спинов, дающие разные равновесные состояния спиновых стекол, сильно различаются между собой. Если перевести систему

из одного такого состояния в другое, то надо переориентировать много спинов. Изменяя направления спинов, мы неизбежно проходим через состояния, энергия которых много больше равновесной. Процесс перехода из одного равновесного состояния в другое напоминает движение шарика из одной ямы в другую через гору (рис. 4). Для перехода между любыми равновесными состояниями в спиновых стеклах требуется преодолеть очень высокие энергетические «горы» (их обычно называют барьерами, а равновесные состояния — долинами).

Большое число равновесных состояний с одинаковой или почти одинаковой энергией — основное отличие спиновых стекол от магнитных кристаллов, и оно ярко проявляется уже в очень простых опытах. Поместим вещество со свойствами спинового стекла во внешнее магнитное поле, которое может быть создано внутри соленоида с током или между полюсами постоянного магнита. Как вы знаете из школьного курса физики, магнитное поле ориентирует магнитные моменты. Спины поворачиваются, в их хаотической ориентации возникает преимущественное направление, и, значит, вещество приобретает магнитный момент.

В антиферромагнетиках величина этого момента зависит только от величины магнитной индукции и от температуры вещества, но не зависит от предыстории образца. Мы, например, можем сначала охладить антиферромагнетик до нужной нам температуры T_0 и потом включить поле, а можем включить поле при более высокой температуре и потом охладить до T_0 — магнитный момент в обоих случаях будет один и тот же. В спиновых стеклах два эти способа «приготовления» образца дают разные результаты. При охлаждении в поле магнитный момент всегда больше, чем если охлаждать без поля. Спиновое стекло «помнит», что с ним было до момента измерения.

При включении поля магнитные моменты атомов не сразу следуют за полем, они имеют своеобразную инер-

цию, связанную с тем, что магнитный момент испытывает нечто похожее на трение об атомы и электроны проводимости. Время, за которое устанавливается ориентация спина вдоль поля, зависит от вещества, но в обычных магнетиках оно очень мало — сравнимо с миллиардной долей секунды или даже меньше. В спиновых стеклах дело обстоит совершенно иначе, хотя «трение» спина об атомы и электроны проводимости такое же, как в обычных магнетиках. Измерения проводились в течение часов или даже суток, и все равно процесс ориентации спинов вдоль магнитного поля продолжался. Более того, и без магнитного поля спиновое стекло все время меняется, причем его внутренняя жизнь не затухает даже через очень большие времена — порядка дней (может быть, лет? или еще больше? мы пока не имеем данных о «времени жизни» спинового стекла).

Свидетельством такой внутренней жизни являются эффекты старения. Охладим спиновое стекло без поля, подождем некоторое время и будем наблюдать за процессом ориентации спинов. Оказывается, что этот процесс существенно зависит от времени ожидания, т. е. от «возраста» спинового стекла. Старение спинового стекла — эффект очень тонкий. Он сказывается на так называемых динамических явлениях, в которых физические величины меняются во времени, например на только что рассмотренном процессе ориентации спинов в поле. Но на статических явлениях, в которых время роли не играет, эффект старения не сказывается. Например, если включить поле при высокой температуре, а потом медленно охладить образец, то магнитный момент не зависит от времени, прошедшего после охлаждения. Если же теперь поле выключить, то процесс уменьшения момента от этого времени зависит.

Необычные свойства спиновых стекол могут быть объяснены с помощью энергетических гор и долин — магнитная система, предоставленная самой себе, медленно переползает из долины в долину, аналогично тому,

как движется шарик в рельефе, изображенном на рисунке 4, б, под влиянием слабых случайных толчков. Толчки слабые, и одного толчка мало, чтобы перепрыгнуть через гору. Направления толчков случайны, так что чаще всего они друг друга компенсируют и большую часть времени шарик находится в какой-то одной яме. Но если терпеливо ждать, то в конце концов может произойти такое маловероятное событие, что толчки в течение длительного времени будут направлены в одну сторону и шарик перепрыгнет в другую яму. Роль толчков для спинов играют тепловые колебания атомов или взаимодействие с электронами проводимости, если спиновое стекло является металлом. Такие междолинные переходы и объясняют эффекты старения и долговременные динамические явления в спиновых стеклах. В обычных же упорядоченных магнетиках потенциальная энергия взаимодействия имеет только одну яму.

Аналогичным образом можно понять и зависимость момента от предыстории. Равновесное состояние в поле сильно отличается от равновесного состояния без поля. Вот почему после включения поля система не остается в долине, соответствующей минимуму энергии без поля; она медленно переползает в нужную долину, и поэтому магнитный момент оказывается сначала меньше равновесного, но потом медленно возрастает, приближаясь к равновесному значению. Иначе обстоит дело, если поле включено при высоких температурах, когда состояния спинового стекла еще нет, нет долин и гор и спины очень быстро принимают равновесную ориентацию. Если теперь температуру медленно уменьшать, то ориентация спинов всегда соответствует равновесной, и потому магнитный момент максимален.

Оставим теперь на время спиновое стекло и рассмотрим классическую задачу теорем оптимизации — задачу коммивояжера. Коммивояжеру, живущему в пункте O (рис. 5), надо составить самый короткий маршрут для

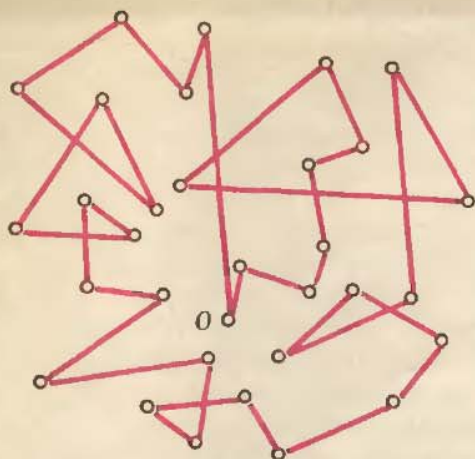


Рис. 5. Возможный маршрут коммивояжера, отправляющегося из города *O*.

того, чтобы посетить соседние города, изображенные на рисунке точками, и вернуться обратно. Как ни выбирай маршрут, между некоторыми городами придется двигаться не по прямой, а по ломаной, т. е. не оптимальным образом. Где же выгоднее проиграть, а где выиграть, чтобы в целом был все же кратчайший маршрут?

Сразу чувствуется, что эта задача очень похожа на нахождение равновесной ориентации спинов, дающей минимум суммарной потенциальной энергии спинового стекла. Ведь и в спиновом стекле, несмотря на то, что суммарная энергия минимальна, во взаимодействии некоторых пар мы выигрываем, а некоторых — проигрываем. Поэтому если длине маршрута коммивояжера удастся сопоставить энергию взаимодействия спинов в стекле, а конкретному маршруту — конкретный набор ориентаций спинов, то задачи будут эквивалентны.

Задача коммивояжера (как и задача о нахождении равновесного состояния спинового стекла) может быть решена на ЭВМ путем перебора всех маршрутов (всех возможных спиновых ориентаций), если число городов (спинов) мало. Время, необходимое для такого перебора, катастрофически растет с увеличением числа объектов перебора (городов, спинов); и когда их число достигает сотен, оказываются бесполезными даже самые быстродействующие ЭВМ.

Эквивалентность задачи коммивоя-

жера и спинового стекла открыла другой путь для нахождения оптимальных маршрутов (их много, как и равновесных конфигураций в спиновом стекле). Можно с помощью ЭВМ смоделировать спиновое стекло. Для этого в память ЭВМ записывают набор энергий взаимодействия спинов и выбирают произвольным образом начальную спиновую конфигурацию. Такая конфигурация, конечно, не соответствует минимуму энергии всей системы. В реальной ситуации спины, испытывая случайные толчки со стороны тепловых колебаний атомов, приходят постепенно в равновесное положение, т. е. в одну из долин. Записывая в памяти ЭВМ физические законы, по которым меняют свою ориентацию спины под действием толчков, можно воспроизвести этот процесс на ЭВМ и тем самым найти оптимальную конфигурацию спинов, а значит, и оптимальный маршрут коммивояжера. Оказалось, что такой способ нахождения оптимального маршрута гораздо эффективнее всех способов перебора. Физическая аналогия позволяет лучшим способом решить задачу оптимизации!

Аналогия со спиновым стеклом прослеживается и в другой задаче по оптимизации, имеющей непосредственное отношение к конструированию сложных электронных систем, например компьютеров. Начинка компьютеров состоит из электронных сетей, распределенных по отдельным блокам. Желательно, чтобы число соединительных проводов между блоками было поменьше, так как большая длина проводов увеличивает время прохождения сигнала и, значит, уменьшает быстродействие компьютера. С другой стороны, нельзя все элементы поместить в один блок, так как это приводит к паразитным шумам, искажающим сигнал. Число соединительных проводов различно для различных элементов. Задача состоит в том, чтобы разместить элементы по блокам оптимальным образом, так, чтобы число их в каждом блоке было примерно одинаково, а количество проводов, пересекающих границы бло-

ков, — минимально. Если сопоставить положению конкретного элемента в том или ином блоке ориентацию одного из спинов, то сразу станет ясной аналогия этой задачи оптимизации с проблемой определения устойчивой конфигурации спинов в спиновом стекле.

Мы уже говорили, что спиновое стекло обладает своего рода памятью. Если его намагнитить, а потом выключить поле, то система переходит в ближайшую долину, т. е. в ту из них, в которой ориентации спинов наиболее похожи на ориентации спинов в намагниченном состоянии (также ведет себя шарик, который поднят на склон одной из гор, а затем отпущен). Это и значит, что спиновое стекло запомнило ту ориентацию спинов, которая была в магнитном поле.

Конкретный набор ориентаций спинов, соответствующий какой-либо долине, можно рассматривать как образ, который система запомнила. Тогда переход из начального состояния в долину естественно рассматривать как отождествление образа, поданного на вход системы, с образом, хранящимся в памяти. При этом образ, поданный на вход системы, будет отождест-

вляться с тем из образов, хранящимся в памяти системы, который мало отличается от входного. Это означает, что если долины соответствуют, например, образам разных зверей, а на вход будет подан образ зайца без ноги, то система отождествит его с зайцем, а не с волком, несмотря на то, что в памяти хранится образ зайца со всеми четырьмя ногами.

Говорят, что система обладает ассоциативной памятью (по ассоциации). Эта память, в отличие от памяти ЭВМ, хранится не в отдельных ячейках, а является коллективным свойством всей системы в целом. Поэтому он обладает важным преимуществом — отсутствием чувствительности к дефектам. Выключение или порча части системы приведет лишь к менее качественному распознаванию образов, но память остается.

Полагают, что точно так же «работает» и система нейронных сетей головного мозга, обеспечивающая человеческую память.

Интенсивное изучение спиновых стекол продолжается. И кто знает, сколько неожиданного и интересного таят в себе эти прозаические на первый взгляд материалы.

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ЛИЦЕЙ

принимает учащихся 8—11 классов на заочные отделения физики и математики по подготовке к поступлению в любой вуз

Преподавателями Лицея совместно с Московским физико-техническим институтом разработаны специальные учебно-методические пособия для заочного обучения, содержащие теорию, методы решения задач, контрольные задания и примеры решений более 1500 конкурсных задач.

Исключительное право на их использование принадлежит Политехническому лицей.

Все учащиеся проходят обучение по полной программе, независимо от того, с какого класса поступили в Лицей.

Общая стоимость обучения на одном отделении — 216 руб.

Эта плата вносится сразу только учащимися 11-х классов.

Восьмиклассники вносят ежегодно по 54 руб.,

девятиклассники — по 72 руб., десятиклассники — по 108 руб.

Для поступления на одно отделение (или на оба одновременно) направьте заявление в Лицей по адресу:

252001, г. Киев-1, ул. Крещатик-12, Политехнический лицей.

Укажите вуз, в который вы хотите поступать.

К заявлению приложите квитанцию об оплате одного учебного года.

Оплату можно произвести из любого почтового отделения обычным почтовым переводом на адрес:

252001, г. Киев-1, Печерское отделение УСБ, р/с 1609455, Политехнический лицей.

Начало занятий первого потока — 10 мая, второго потока — 10 октября.

Предприятия могут произвести оплату по безналичному расчету, для них сообщаем — МФО 322090.

Мы готовы передавать методику обучения подготовительным отделениям институтов, а также открывать филиалы Лицея. Справки по телефону (044) 228-81-85.