

Намагничивает свет

Э. Нагаев

Утверждение, что вещество можно намагнитить светом, вероятно, может вызвать самые противоречивые отклики. Скептики тут же бы сказали, что размагнитить светом можно, а вот наоборот – навряд ли. Ведь всем известно, что свет греет предметы, на которые он падает, а при нагреве сила магнита уменьшается. Люди же более легковверные скорее всего решили бы, что раз с магнетизмом всегда были связаны всякие чудеса (см. «Наука и жизнь» №7, 1985 г.), то почему бы свету и не намагнитить какой-нибудь предмет. И, как ни странно, оказались бы правы именно «легковверные».

Провидение Фарадея

Во-первых, как мы с вами увидим, свет может намагнитить такие тела, которые вообще не были намагничены до освещения. Во-вторых, даже если они и были намагничены, то тепловое действие света можно не рассматривать. Ведь нагреть кристалл можно и множеством других способов – у света нет никакого специфического действия. Разогрев светом можно исключить, сравнивая намагниченность освещенного кристалла с намагниченностью в темноте того же кристалла, нагретого до такой же температуры каким-либо другим способом. Вот тогда-то и станет ясно, что на самом деле свет может увеличивать намагниченность магнитов. Физические же процессы, ведущие к фотонамагничиванию, как оказалось, весьма сложны. Здесь мы сталкиваемся с такими тонкостями, выявить и понять которые сумела лишь столь мощная отрасль современной науки, как квантовая теория твердого тела.



vivovoco.rsl.ru

Майкл Фарадей

Впервые гипотезу о возможности намагничивания светом высказал Фарадей. Видимо, это было проявлением гениальной интуиции замечательного



liveinternet.ru

экспериментатора: состояние науки в то время не позволяло ни обосновать эту гипотезу теоретически, ни подтвердить ее экспериментально. По-настоящему понять фотомагнитный эффект удалось только после того, как были построены квантовые теории магнетизма и излучения. Однако путь к успеху был достаточно драматичным. Первоначальные теоретические оценки эффекта оказались ошибочными, завышая его чуть ли не в миллион раз. По этим оценкам получалось, что обычной лампочкой накаливания можно намагнитить материал сильнее, чем сильнейшим электромагнитом (пусть читатели не сделают

отсюда вывода, что слова капитана Врунгеля «навигация есть наука неточная» автоматически переносятся и на теоретическую физику). Но в науке бывает и так, что даже ошибочные результаты приносят пользу – здесь они стимулировали экспериментальное исследование фотомагнетизма.

«Темновой» магнетизм

Начиная рассказ о фотомагнетизме, стоило бы, наверное, прежде всего вспомнить саму физику магнитных явлений – в отсутствии освещения. Магнитные свойства вещества обусловлены наличием в нем электронов. Электрон – это не только элементарный заряд, он еще и элементарный магнетик. Магнетизм электрона вызван тем, что он, во-первых, заряжен и, во-вторых, совершает сложное внутреннее движение. Для наглядности, уподобляя электрон шарик, говорят, что он вращается вокруг своей оси. Но круговое движение заряда, находящегося на шарике, и превращает шарик в магнит, подобно тому, как протекание тока



фото В.Н. Витер



по виткам катушки (тоже круговое движение заряда) превращает ее в электромагнит.

Чтобы охарактеризовать магнит, обычно используют понятие магнитного момента – это вектор, направленный от одного полюса магнита к другому и пропорциональный силе магнита. У вращающегося шарика магнитный момент пропорционален одной из самых важных механических величин – моменту количества движения и направлен по оси вращения. Магнитные моменты всех электронов, входящих в атом, складываются друг с другом. У большинства атомов суммарный момент равен нулю, то есть они немагнитны. Но у таких элементов, как железо, он отличен от нуля, поэтому атомы железа оказываются маленькими магнитиками.

Мы перешли, таким образом, от магнетизма электронов к магнетизму атомов. Сделаем теперь следующий шаг и перейдем к магнетизму кристаллов, в состав которых входят магнитные атомы. Самое главное – в магнитном кристалле между атомами-магнитиками существует взаимодействие, стремящееся направить их моменты определенным образом по отношению друг к другу. Первое, что приходит в голову, когда речь идет о таком взаимном влиянии, – это представление о простом взаимодействии между магнитами через магнитные поля, создаваемые каждым из них. Но оказывается, что, кроме него, существует гораздо более сильное и важное взаимодействие квантовомеханической природы, называемое обменным. Хотя считается, что природу обменного взаимодействия невозможно объяснить элементарно, все же попробуем это сделать. Вот что, наверное, действительно нельзя сделать элементарно, это объяснить сам термин «обменное».

Рассмотрим простую модель: два атома, на каждом из которых находится по электрону. Эти электроны вращаются каждый вокруг своего атома, то приближаясь, то удаляясь друг от друга. Как и любые два одноименных заряда, они расталкиваются кулоновскими силами, и поэтому энергия взаимодействия электронов увеличивается при уменьшении расстояния между ними. Квантовая природа частиц проявляется в том, что электронам с одинаковыми направлениями моментов запрещено близко подходить друг к другу, для электронов же с противоположно направленными моментами такого запрета нет. Этот запрет вытекает из фундаментального принципа квантовой физики – принципа Паули, согласно которому в каждом квантовом состоянии может находиться не более одного электрона. А раз электроны с параллельными моментами в среднем дальше друг от друга, чем электроны с антипараллельными моментами, то энергия отталкивания первых меньше. Но природа устроена так, что



она предпочитает состояния с наименьшей энергией, – например, шарик всегда скатывается в лунку. Поэтому в рассматриваемом случае моменты электронов должны быть параллельны друг другу – так «выгоднее» природе.

Каковы же основные свойства обменного взаимодействия? Во-первых, оно быстро спадает с ростом расстояния между атомами, так как электроны в далеких друг от друга атомах и без того находятся на большом расстоянии и принцип Паули на их движение практически не влияет. Во-вторых, когда атомы сближаются, обменное взаимодействие становится очень сильным. На расстояниях порядка постоянной (периода) кристаллической решетки энергия обменного взаимодействия между двумя моментами оказывается того же порядка, что и энергия этих же моментов в магнитном поле силой в сотни тысяч или миллионы эрстед (см. статью «Магнетизм»). Такие гигантские поля, к тому же постоянные во времени, в существующих экспериментальных устройствах получить нельзя. В-третьих, отнюдь не всегда обменное взаимодействие выстраивает моменты атомов параллельно друг другу, как получилось в нашей модели. Не менее часты случаи, когда обменное взаимодействие стремится направить моменты атомов навстречу друг другу, как говорят физики, антипараллельно.

Раз магнитные атомы в кристалле расположены периодически и раз они связаны друг с другом обменным взаимодействием, то и направления магнитных моментов должны образовывать периодическую структуру. Она должна быть такой, чтобы обменная энергия была минимальна – экономность природы по части энергии соблюдается при любых взаимодействиях.

Если обменное взаимодействие между атомами стремится направить их моменты параллельно друг другу, то тут ситуация ясна сразу: должно установиться ферромагнитное упорядочение.

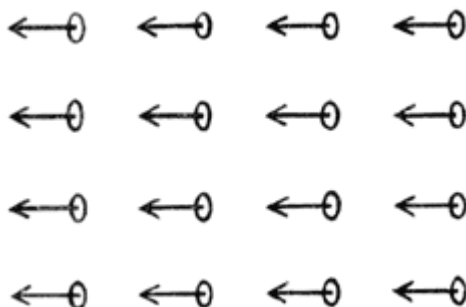


Рис. 1. Ферромагнитное упорядочение. Параллельные стрелки символизируют магнитные моменты атомов, выстроенные вдоль определенного направления



Именно оно проявляется в постоянных магнитах – первых магнитных материалах, ставших известными человечеству. С начала знакомства людей с ферромагнетиками прошли тысячи лет, но лишь недавно стали известны магнитные материалы другого типа – антиферромагнетики. Они были впервые предсказаны крупнейшим советским физиком Л.Д. Ландау, и на его юбилее физики шутили, что бог создал ферромагнетики, а дьявол – антиферромагнетики.

У антиферромагнетиков, в отличие от ферромагнетиков, суммарный магнитный момент кристалла равен нулю. Структуру антиферромагнетиков можно представить как две эквивалентные ферромагнитные решетки с противоположно направленными моментами, вставленные друг в друга. Это можно сделать разными способами.

На рис. 2 изображены две различные антиферромагнитные структуры, возможные в двумерном кристалле с простой квадратной элементарной ячейкой. В трехмерном кристалле число возможных антиферромагнитных структур еще больше. Какая из них осуществится реально, зависит от величин и знаков обменных взаимодействий в кристалле. Но для любой из них необходимо, чтобы хотя бы часть обменных взаимодействий стремилась установить моменты атомов антипараллельно друг другу.

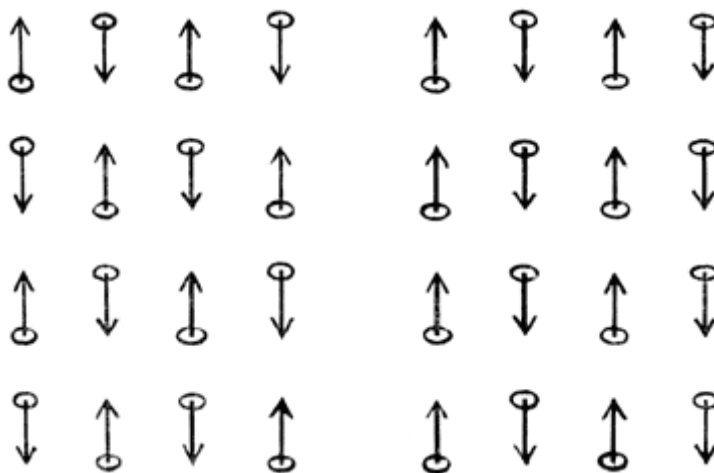
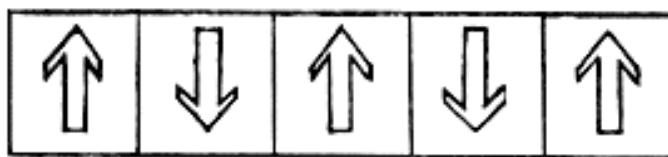


Рис. 2. Антиферромагнитная структура

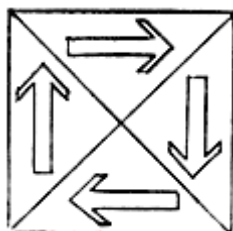
Но и это еще не вся правда про магнитное упорядочение в кристалле. Оказывается, что, кроме упорядочения моментов атомов, о котором сейчас шла речь, существует еще упорядочение суммарных моментов целых областей. Такая простая картина ферромагнетика, как она изображена на рис. 1, справедлива лишь для достаточно малых кристаллов. Большие же ферромагнитные кристаллы оказываются в целом немагнитными из-за того, что они разбиваются на ферромагнитные области



(так называемые домены) с противоположно направленными моментами.



Типичная толщина доменов – порядка 10 микрон, так что их даже можно наблюдать невооруженным глазом. В результате в крупном ферромагнитном кристалле возникает что-то вроде безумно гипертрофированной антиферромагнитной структуры: антипараллельны здесь не моменты отдельных атомов, а моменты доменов, содержащих гигантское число таких атомов (порядка 10^{20} при толщине образца порядка 1 см).



Детали доменной структуры зависят от многих факторов, например, от формы и размеров образца, состояния его поверхности и т.д. Например, возможна доменная структура, при которой моменты соседних доменов не антипараллельны, а перпендикулярны друг другу.

Но все равно и при такой доменной структуре суммарный момент кристалла равен нулю. Энергия доменного упорядочения очень невелика. Чтобы его разрушить и намагнитить ферромагнитный кристалл до насыщения, достаточно полей порядка тысяч эрстед.

Фактически все наше предыдущее рассмотрение относилось к предельно низким температурам, близким к абсолютному нулю. А что же происходит с магнитным упорядочением при нагреве кристалла? Подобно тому, как атомы совершают тепловое движение, так совершают его и магнитные моменты атомов. В ферромагнетике тепловое движение можно представить себе как колебания моментов атомов относительно направления суммарного момента всего кристалла (или домена, если в кристалле много доменов). Такие колебания можно интерпретировать как набор всевозможных отклонений моментов от их положений равновесия – по существу как «пакет» спиновых волн. На квантовом языке такие волны называются магнонами.

Чем выше температура, тем больше амплитуда колебаний моментов, а следовательно, тем меньше намагниченность кристалла. При некоторой температуре T_c , называемой точкой Кюри, (по имени выдающегося французского физика),



намагниченность точно обращается в нуль.

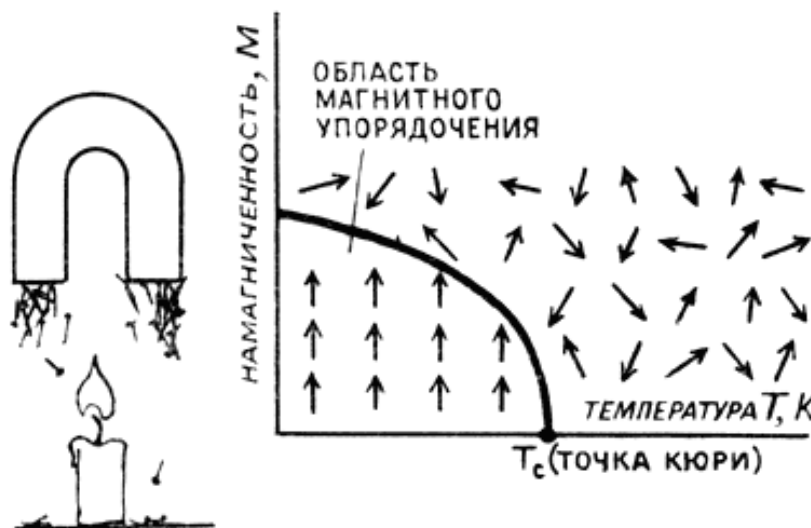


Рис. 5. Зависимость намагниченности ферромагнетика от температуры. При нагревании до некоторой температуры, называемой точкой Кюри, намагниченность исчезает, и магнит перестает притягивать железные предметы

Это явление, называемое фазовым переходом из намагниченного состояния в ненамагниченное, сопровождается необычным поведением ряда физических величин. Например, магнитная восприимчивость – отношение намагниченности, наведенной внешним полем, к величине этого поля – в точке Кюри обращается в бесконечность, а другая важная физическая величина, теплоемкость, проходит через высокий максимум.

Проблема фазовых переходов всегда была одной из центральных в физике. Она



Пьер Кюри (vivovoco.rsl.ru)

и в самом деле интригующа – людям всегда хотелось понять механизм, благодаря которому в системе взаимодействующих друг с другом атомов, молекул или каких-нибудь других физических объектов при ничтожно малом изменении внешних условий вдруг появляются принципиально новые качества (например, самопроизвольная намагниченность при понижении температуры ниже точки Кюри). В известном смысле фазовые переходы в физике моделируют процесс появления качественно новых свойств и в других системах, например, биологических или социальных (революция –

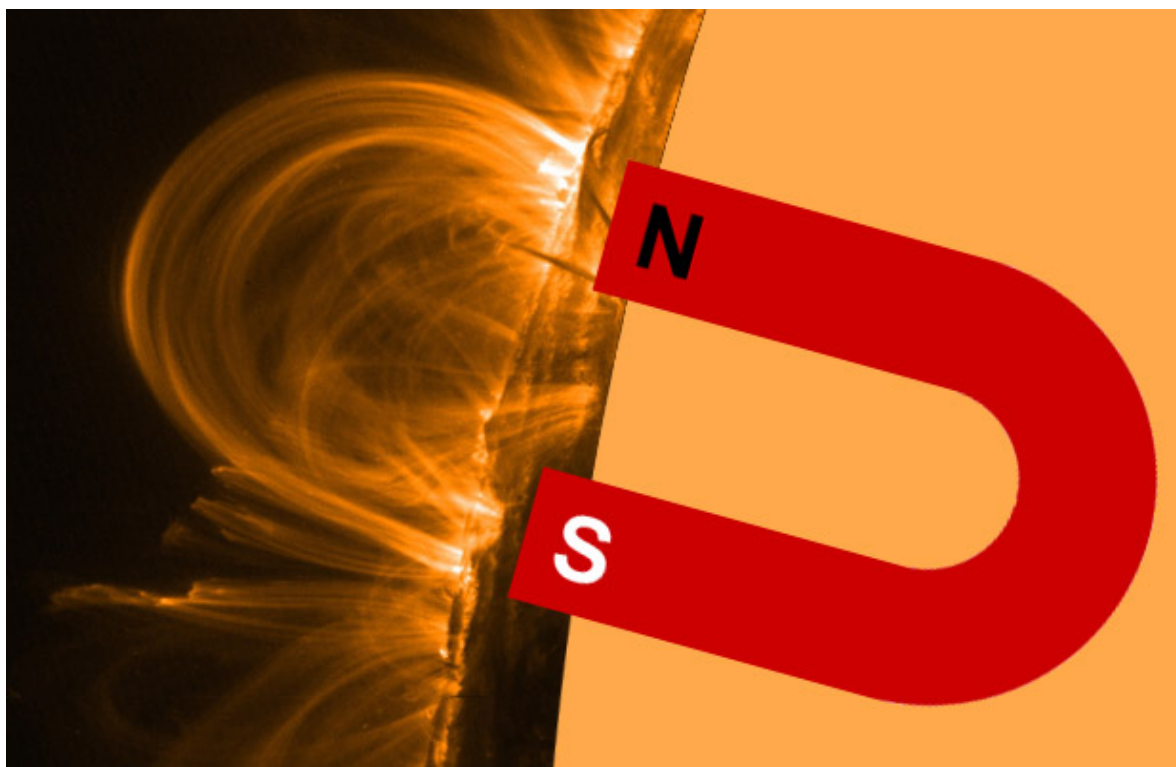


чем не фазовый переход?). Большие успехи в исследовании фазовых переходов были достигнуты в последнее время, в частности, был разработан необычайно изящный математический аппарат теории фазовых переходов. Например, в нем используется такой прием: результаты сначала получаются для пространства размерности «чуть меньше 4» (попробуйте пожить в таком пространстве!), а затем они экстраполируются на трехмерное пространство. Создателю этой методики американцу Роберту Вильсону была присуждена Нобелевская премия.

Фотомagnetизм немагнитных материалов

Итак, мы выяснили, что в основе магнетизма лежат три фундаментальных факта:

- 1) у электронов или атомов имеются магнитные моменты,
- 2) обменное взаимодействие между этими моментами приводит к их магнитному упорядочению,
- 3) существует доменная структура.



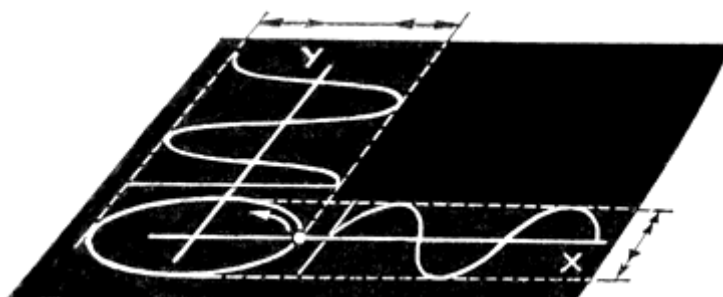
windows.ucar.edu

Как оказалось, на каждое из этих проявлений магнетизма может влиять свет – так и появляются у вещества фотомagnetные свойства. В сущности, можно даже говорить



не об одном, а о трех разных типах фотомagnetизма. Мы начнем с фотомagnetизма первого типа, свойственного системе электронов или магнитных атомов с пренебрежимо слабым обменным взаимодействием между ними и потому без освещения заведомо не намагниченной. Примером такой системы могут служить электроны проводимости в полупроводнике, среднее расстояние между которыми настолько велико, что обменные силы ничтожно малы. Оказывается, что в таких материалах (их принято называть слабыми магнетиками в отличие от сильных магнетиков – ферромагнетиков или антиферромагнетиков) свет может привести к появлению намагничения путем непосредственного воздействия на магнитные моменты электронов. Эффект чрезвычайно мал, но именно этот вид фотомagnetизма и был впервые обнаружен экспериментально. Как же происходит такое «непосредственное воздействие»?

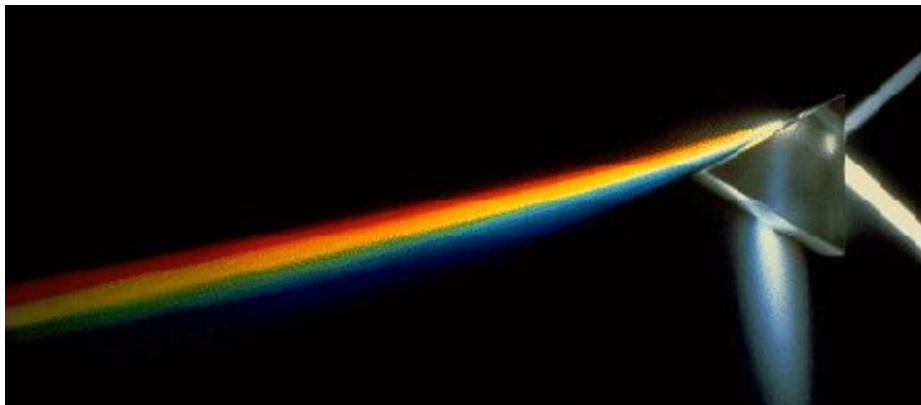
Чтобы вызвать прямое намагничение, свет должен обладать определенными свойствами, к анализу которых мы сейчас и перейдем. Как известно, свет можно описывать и с классической, и с квантовой точек зрения. На классическом языке свет – это волна связанных друг с другом электрических и магнитных колебаний. Простейшее колебание – линейное, по одной оси, как например, колеблется шарик, привязанный к пружинке. Но возможны и более сложные колебания, например, происходящие вдоль двух взаимно перпендикулярных осей. При равенстве амплитуд обоих колебаний суммарное движение в этом случае – просто движение по кругу. В эквивалентности двух движений – кругового и колебательного – можно убедиться, если спроецировать координаты частицы, движущейся по кругу, на координатные оси.



Точно так же и в световой волне конец вектора напряженности электрического (или магнитного) поля может колебаться вдоль одной из осей или совершать круговое движение. В первом случае говорят, что свет линейно поляризован, во втором – что он поляризован по кругу. В натуральном свете нет определенной поляризации, поскольку поляризация света, испускаемого любым атомом светящегося тела, никак не связана с



поляризацией света, исходящего от других атомов. Однако существуют оптические приборы, позволяющие выделить свет с требуемой поляризацией.



wikipedia

С квантовой точки зрения свет представляет собой совокупность элементарных частиц – фотонов. Эти частицы отличаются от всех других (в частности, электронов) тем, что скорость их движения неизменна (она равна фундаментальной постоянной – скорости света), и потому бессмысленно говорить о массе фотона в покоящемся состоянии. Во всех же остальных отношениях фотоны подобны обычным частицам: у них есть энергия, импульс и, что кажется особенно удивительным, момент количества движения – как если бы фотон вращался вокруг своей оси. Естественно, «вращение» фотона в квантовой картине оказывается аналогом круговой поляризации света в классической. Свет, поляризованный по кругу, с квантовой точки зрения представляет собой поток фотонов, «вращающихся» вдоль одной и той же оси в одну и ту же сторону (то есть с одинаковым направлением вектора момента количества движения). Линейно-поляризованный свет соответствует потоку фотонов, которые все вращаются вокруг одной и той же оси, но половина – по часовой стрелке, а половина – против нее: ведь сумма двух вращений в противоположных направлениях – это осциллирующее движение по прямой. В естественном же свете, скажем, испускаемом Солнцем, и оси, и направления вращения фотонов совершенно хаотичны.

Теперь мы знаем все необходимое для того, чтобы понять, почему свет может намагнитить даже немагнитные тела. Представим себе, что на систему электронов падает свет, поляризованный по кругу. При поглощении фотонов веществом они передают свое вращение электронам, поскольку должен выполняться закон сохранения момента количества движения. Но вращение электрона, как мы уже видели, приводит к появлению у него магнитного момента. Поскольку все поглощенные



фотоны вращались в одну и ту же сторону, то и дополнительные магнитные моменты, возникшие у электронов вследствие поглощения фотонов, оказываются направленными одинаково. Вот почему свет, поляризованный по кругу, действует подобно постоянному магнитному полю, вызывая появление у электронов суммарного магнитного момента. А вот линейно поляризованный и естественный свет не могут создать намагниченности по такому же принципу, так как число фотонов, вращающихся в одну сторону, равно числу фотонов, вращающихся в противоположном направлении.

Как свет изменяет магнитную структуру

Фотомагнитные явления в сильных магнетиках оказываются гораздо более разнообразными и несравненно более мощными. И здесь выяснилось, что намагничивать может не только свет, поляризованный по кругу, но и линейно-поляризованный и даже естественный свет. Но, чтобы разобраться в ситуации, нужно сначала продолжить наш разговор о том, как свет действует на вещество.

Известно, что поглощение света приводит к возбуждению атомов (на квантовом языке это называется рождением на атоме квазичастицы – экситона). Линейно-поляризованный свет, у которого момент количества движения равен нулю, не может изменить суммарного момента количества движения системы атомов. Один из возможных способов подчиниться этому закону сохранения – сделать так, чтобы при оптическом возбуждении момент магнитного атома не менялся. Но есть и другие возможности.

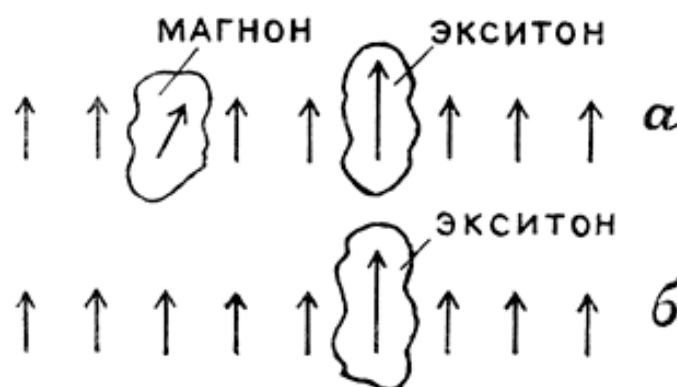


Рис. 7. Возбуждение ферромагнетика светом. Длинная стрелка – магнитный момент возбужденного атома, короткая наклоненная стрелка символизирует родившийся магнон; а) состояние кристалла в момент поглощения фотона; б) после гибели магнона

Для примера рассмотрим ферромагнетик (рис. 7), и пусть под действием света



один из его атомов перешел в возбужденное состояние с увеличенным магнитным моментом. Чтобы скомпенсировать это увеличение, моменты остальных атомов отклоняются от направления среднего момента кристалла, иными словами, в кристалле рождается магنون.

Хотя в момент поглощения фотона намагниченность кристалла не изменилась, она изменится чуть позже. Дело в том, что и экситон, и магنون имеют конечные времена жизни: атом в конце концов переходит в основное состояние, а отклонение момента исчезает. Эти времена жизни различны. Допустим, что у экситона оно больше. Тогда магнитный момент кристалла в том промежутке времени, когда магنون уже исчез, а экситон еще «жив», превышает первоначальный. Поскольку на самом деле поглощение фотонов происходит непрерывно, получается, что за счет разницы во времени жизни число экситонов в каждый момент больше, чем магнонов, то есть свет увеличивает намагниченность кристалла.

По существу, именно эта идея была реализована в исключительно изящных экспериментах известного американского специалиста по лазерам А. Шавлова. Однако вместо ферромагнетика использовалась более сложная система – антиферромагнетик, состоящий из двух ферромагнитных подрешеток с противоположными направлениями магнитных моментов (см. рис. 2). Линейная поляризация света подбиралась таким образом, чтобы возбуждать в одной из подрешеток экситон с пониженным значением момента. Тогда, чтобы сохранить суммарный момент, магنون появлялся не в той же подрешетке (там он сделал бы момент еще меньше), а в другой. Так как при этом магнитный момент каждой из подрешеток уменьшался на одну и ту же величину, суммарный момент кристалла при поглощении фотона вообще не изменялся. Однако из-за разницы во временах жизни экситонов и магнонов магнитный момент подрешетки с экситонами в ней отличался от момента подрешетки с магнонами в ней, то есть суммарный момент кристалла становился отличным от нуля. Работа Шавлова – блестящий пример того, как много может достичь экспериментатор, если он в ладах с теорией. Удача экспериментатора часто случайна, но тысячу раз прав французский философ Монтень, сказавший, что случай приходит на помощь умам подготовленным.

Однако свет вовсе не обязательно порождает намагниченность. Он может приводить и к другому типу перестройки магнитной структуры – например, замене одной антиферромагнитной конфигурации на другую (типа перехода от структуры рис. 7а к рис. 7б). Такой вид фотомagnetизма впервые наблюдался ленинградскими



физиками Е.И. Головенчицем и В.А. Саниной с использованием весьма совершенной лазерной методики. Физически перестройка антиферромагнитной структуры вызвана тем, что при возбуждении магнитного атома меняется его обменное взаимодействие с соседями. Поэтому, если число возбужденных атомов достаточно велико, то вся система может предпочесть другую магнитную структуру. Ввиду малого радиуса обменных сил для этого необходимо, чтобы возбужденные атомы были расположены вплотную друг к другу. Если же возбуждены не все атомы кристалла, а их сравнительно небольшая часть, то необходимо, чтобы в кристаллической решетке появились экситонные «капли» (рис. 8) – в них магнитная структура будет иной, чем в остальной части кристалла. Образованию экситонной жидкости способствуют два фактора: во-первых, экситоны часто притягиваются друг к другу электростатическими силами. Во-вторых, время жизни экситонов внутри капли может быть гораздо больше, чем вне ее (это самый настоящий коллективизм – «возьмемся за руки друзья, чтобы не пропасть по одиночке»).

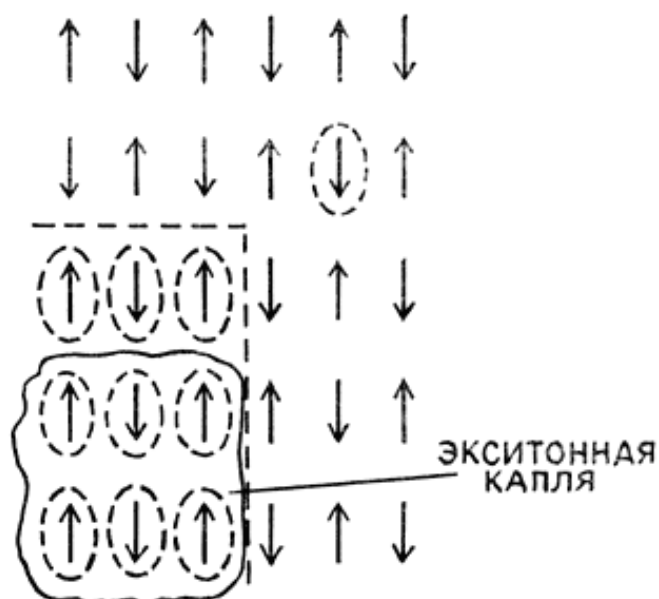


Рис. 8. Экситоны в антиферромагнитной структуре. Кружками обведены возбужденные атомы. В левом нижнем углу – экситонная капля

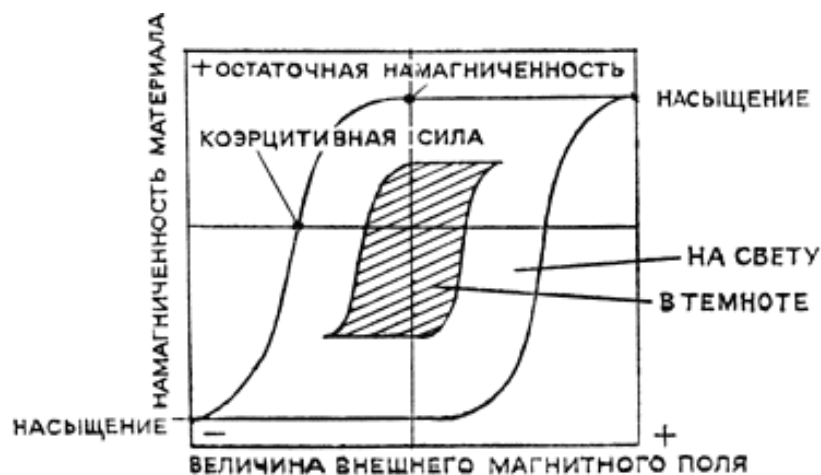
Что же касается голубой мечты первых исследователей фотомagnetизма – светом превратить антиферромагнетик в ферромагнетик, то, увы, она совершенно нереальна. Однако, как было впервые теоретически доказано в нашей стране и подтверждено экспериментами швейцарца Вахтера, каждый фотоэлектрон может создать внутри антиферромагнетика небольшую ферромагнитную область и даже, оставшись внутри нее, придать ей стабильность. Есть материалы, в которых каждый электрон делает



ферромагнитной область из нескольких тысяч атомов. Такая система – электрон проводимости плюс созданная им ферромагнитная область получила название «феррон».

Свет перестраивает структуры

И теперь осталось поговорить о последнем виде фотомagnetизма – доменном. Энергия доменного упорядочения весьма мала, и поэтому можно ожидать, что свет на доменный магнетизм будет влиять сильнее всего. Впервые доменный фотомagnetизм обнаружил голландский физик Энц, исследуя высокочастотную магнитную восприимчивость ферромагнетика: даже при освещении обычной лампочкой накаливания она понижалась в несколько раз. Энц наблюдал и другое интересное явление: под действием света существенно расширялась петля гистерезиса.



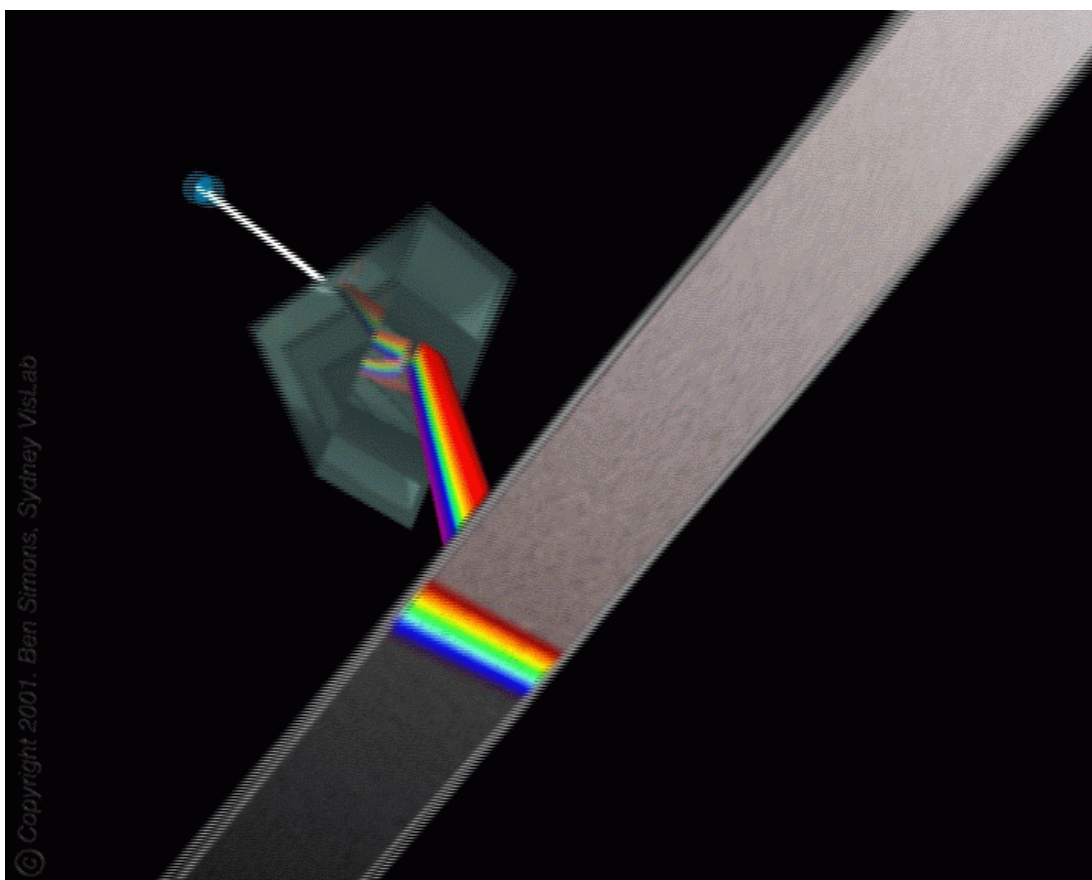
Если поместить ферромагнетик во внешнее магнитное поле, направленное противоположно его намагниченности, то он перемагнитится в противоположном направлении лишь в достаточно большом поле.

Другой интересный и, по существу, принципиальной значимости эффект был открыт киевлянином В.Ф. Коваленко, очень плодотворно работающим в области фотомagnetизма. Он обнаружил радикальную перестройку доменной структуры под действием света типа перехода от структуры, изображенной на рис. 3, к структуре, показанной на рис. 4 (на самом деле структуры, которые он наблюдал, были еще сложнее). Характер структуры изменялся потому, что линейно-поляризованный свет, которым освещался кристалл, стремится сориентировать моменты в доменах определенным образом по отношению к направлению поляризации света. В некоторых материалах в отсутствие магнитного поля наблюдается движение доменной структуры,



вызванное освещением, – по кристаллу как бы катятся доменные волны (это явление было обнаружено красноярским физиком Ю.М. Федоровым).

Как мы видим, магнетизм подарил физикам множество интересных и красивых проблем, и в процессе изучения только одного их класса – физики фотомагнитных явлений – мы узнали удивительные и очень полезные для практики вещи. И кто знает, может быть, именно фотомагнетизму вскоре суждено стать самым главным физическим принципом, на котором будут основаны оптическая запись и считывание информации в компьютерах следующих поколений.



oldsite.vislab.usyd.edu.au

(Наука и жизнь)