

разец может сохранить остаточную намагниченность M_r и для его полного размагничивания нужно приложить обратное магн. поле ($-H_c$), к-рое наз. *коэрцитивной силой*. В зависимости от величины H_c различают *магнитно-мягкие материалы* ($H_c \leq 800$ А/м, или 10 Э) и *магнитно-твёрдые материалы* (высококоэрцитивные) ($H_c > 4$ кА/м, или 50 Э). Значения M_r и H_c зависят от природы в-ва, от темп-ры и, как правило, убывают с её ростом, стремясь к нулю при $T \rightarrow T_C$. Доменная структура энергетически выгодна лишь в достаточно объёмных образцах. С уменьшением размера образца разбиение его на домены может стать энергетически невыгодным и он становится *однодоменным* с $M = M_s$. Из-за тепловых флуктуаций магн. момент одного домена может вести себя как атомный магн. момент в идеальном парамагнетике (ПМ), такое явление наз. *суперпарамагнетизмом*.

Антиферромагнетизм наблюдается в веществах с $\epsilon_{0,6} < 0$: в кристаллич. Сг, α -Мп, в ряде РЗМ (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu), а также в многочисленных соединениях (оксидах, сульфиды Fe, Ni, Mn и др. элементов), сплавах (Fe_2Mn , CrPt и др.) и аморфных веществах, содержащих атомы переходных элементов. Кристаллич. решётка этих веществ разбивается на две или более *магнитные подрешётки*, в к-рых векторы M_s либо антипараллельны (коллинеарная магнитная атомная структура), либо направлены под углом друг к другу, отличным от π (неколлинеарная структура). Антиферромагнетизм наблюдается в интервале темп-р от 0 К до точки Нееля T_N . При $T > T_N$ АФМ становится ПМ и его восприимчивость χ описывается в большинстве случаев законом Кюри — Вейса. При $T \leq T_N$ χ с понижением темп-ры уменьшается из-за роста магн. упорядоченности. В АФМ различают χ_{\parallel} и χ_{\perp} — магн. восприимчивости вдоль и поперёк оси антиферромагнетизма — направления, в к-ром ориентируются векторы M_s магн. подрешёток при $T < T_N$.

В зависимости от того, равен или неравен нулю суммарный момент всех магн. подрешёток АФМ, различают *скомпенсированный антиферромагнетизм* и *нескомпенсированный антиферромагнетизм*, или *ферримагнетизм*. В ферримагнетиках (ФИМ) имеются магн. ионы двух или более типов разной хим. природы или одной природы, но разной валентности (напр., Fe^{2+} и Fe^{3+}), либо ионы одной хим. природы, одной валентности, но имеющие в магн. подрешётках разное число узлов в единице объёма образца. Ферримагнетизм реализуется гл. обр. в кристаллах окислов *d*-металлов с решётками типов шпинели, граната, перовскита и др. (т. н. *ферриты* $MO \cdot Fe_2O_3$, где M обозначает Fe, Ni, Co, Mn и др.). Эти вещества, как правило, по электрич. свойствам — ПП или диэлектрики, по магн. свойствам они похожи на ФМ [с нек-рыми отличиями в ходе температурных зависимостей $M_s(T)$ и $\chi(T)$]. У аморфных ФИМ (напр., $Gd_{30}Co_{70}$, $TbFe_2$ и др.) магн. ионы двух или более сортов размещены в пространстве случайно. Нек-рой модификацией кристаллич. ФИМ являются (уже упоминавшиеся выше) сперомагнетики (СИМ), в них магн. моменты одного из сортов магн. ионов «заморожены» со случайной ориентацией. Преобладание ферромагн. упорядочения в системе одного из сортов магн. ионов приводит к тому, что СИМ обладают суммарной спонтанной намагниченностью ($M_s \neq 0$).

В АФМ возможно спонтанное нарушение полной компенсации намагниченности подрешёток в результате релятивистского взаимодействия Дзялошинского — Мория (возмущения магн. спин-орбитального взаимодействия взаимодействием орбиталей магн. ионов при наличии косвенного обменного взаимодействия); в итоге имеет место *слабый ферромагнетизм* (СФМ) с $M_s \sim 0,1\%$ от обычных значений M_s для ФМ (типичные представители СФМ: α - Fe_2O_3 , карбонаты ряда металлов, ортоферриты и др.).

Кроме упомянутых выше спиновых стёкол магн. упорядочение наблюдается в очень широком классе

аморфных металлич. веществ — *металлических стёкол* (метглассах), обладающих рядом специфич. свойств ($Fe_{90}B_{10}$, $Fe_{75}Mo_{25}B_{20}$, $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_8$, $Ni_{60}Nb_{40}$ и др.). Металлич. стёкла практически почти лишены магн. анизотропии, что делает их очень хорошими магнитно-мягкими материалами.

Научные и технические проблемы магнетизма

Осн. научными проблемами совр. М. являются: 1) выяснение природы обменного взаимодействия и взаимодействий, определяющих анизотропию в разл. магнетиках; объяснение спектров элементарных магн. возбуждений (*магнонов*) и механизма их взаимодействий между собой и с др. модами элементарных возбуждений в веществе — *фононами*, электронами, проводимости, *экситонами* и др. 2) Проблема нелинейной динамики доменных стенок — *солитонов* магнитных (связанных состояний) большого числа магнонов). 3) Развитие теории *магнитных фазовых переходов* между различными магн. состояниями (ФМ—ПМ, ФМ—АФМ и др.), в том числе т. н. *ориентационные фазовые переходы*. Здесь важное место занимают представления о волнах зарядовой и спиновой плотности, а также спонтанного нарушения *магнитной симметрии* (см. *Волны зарядовой плотности, Спиновой плотности волны*).

М. веществ широко используется как средство изучения хим. связей и структуры молекул (см. *Магнетохимия*). Изучение диамагнетизма и парамагнетизма газов, жидкостей, растворов и соединений в твёрдой фазе позволяет разобраться в деталях физ. и хим. процессов, протекающих в этих веществах, и происходящих в них структурных изменениях. Изучение магн. динамич. характеристик (*магнитного резонанса и релаксации*) помогает понять кинетику многих физ. и физ.-хим. процессов. Интенсивно развивается магнетиология, а также применение М. в медицине (см. *Магнитные поля биологических объектов*).

Связь М. и оптич. свойств веществ приводит к огромному числу физ. эффектов (см. *Зеемана эффект, Фарадея эффект, Коттона — Муттона эффект, Халле эффект* и др.), в т. ч. к влиянию света на возникновение и изменение магн. порядка.

К важнейшим проблемам М. космоса относятся: выяснение происхождения магн. полей *Земли*, др. планет, *Солнца*, *звёзд* (в частности, *пульсаров*), радиогалактик, квазаров и др. астрономич. объектов, а также роли магн. полей в космич. пространстве (см. *Межзвёздная среда*).

Проблемы технич. применений М. входят в число важнейших в электротехнике, приборостроении, вычислит. технике, автоматике и телемеханике, навигации. В технике широкое применение нашли магн. *дефектоскопия* и др. магн. методы контроля. Очень важную роль играют измерения магн. характеристик электротехнич. и радиотехнич. материалов. Магн. материалы идут на изготовление магнитопроводов электрич. генераторов, моторов, трансформаторов, реле, магн. усилителей, элементов магн. памяти, лент и дисков магн. записи, стрелок магн. компасов, магнитострикционных излучателей и приёмников и т. д.

Историческая справка

Первые письменные свидетельства о М. (Китай) имеют более 2000-летнюю давность, в них упоминается об использовании естеств. постоянных магнитов в качестве компасов. В работах древнегреч. и римских учёных упоминается о притяжении и отталкивании магнитов и о намагничивании магнитом железных опилок (напр., у Лукреция Кара в поэме «О природе вещей», 1 в. до н. э.). В средние века в Европе широко применялся магн. компас (с 12 в. н. э.), предпринимались эксперименты по изучению свойств магнитов [Пьер де Марикур (Pierre de Maricourt), Франция, 1269]. Результаты исследований М. в эпоху Возрождения обобщены У. Гильбертом (W. Gilbert) в трактате «О маг-