

образующие атомные ядра, атомы, молекулы и все макротела (газы, жидкости, кристаллич. и аморфные твёрдые тела) имеют собств. магн. момент, то, в принципе, все вещества подвержены влиянию магн. поля — обладают магн. свойствами, т. е. являются *магнетиками*.

Известны два осн. эффекта воздействия внеш. магн. поля  $H_{вн}$  на вещества: 1) по закону *электромагнитной индукции* при помещении тела в поле  $H_{вн}$  в теле возникает индукц. ток, магн. поле к-рого направлено против  $H_{вн}$  (*Ленца правило*), т. е. магн. момент вещества, создаваемый  $H_{вн}$ , всегда направлен против поля (*диамагнетизм* веществ); 2) если атомы вещества имеют спонтанный магн. момент, то  $H_{вн}$  ориентирует атомные магн. моменты вдоль своего направления и создаёт магн. момент вещества вдоль поля (*парамагнетизм* веществ). Существ. влияние на магн. свойства вещества могут оказывать и внутр. взаимодействия (электрич. и магн.) микрочастиц — носителей магн. момента. Иногда они приводят к спонтанной (не зависящей от  $H_{вн}$ ) упорядоченной ориентации магн. моментов частиц. Вещества, в к-рых атомные магн. моменты спонтанно ориентируются параллельно друг другу, наз. ферромагнетиками (ФМ) (см. *Ферромагнетизм*), а вещества, в к-рых ориентация отд. групп атомных моментов антипараллельна, — антиферромагнетиками (АФМ) (см. *Антиферромагнетизм*). Кроме таких коллинеарных ФМ- и АФМ-структур наблюдаются и неколлинеарные *магнитные атомные структуры* (винтовые или спиральные, трехосные и др.). Сложность атомной структуры веществ, построенных из огромного числа микрочастиц, даёт практически неисчерпаемое разнообразие их магн. свойств, связь к-рых с немагн. свойствами (электрич., механич., оптич. и др.) позволяет использовать исследование магн. свойств для получения информации о внутр. структуре и др. свойствах микрочастиц и макротел.

Огромный диапазон проявлений М. — от М. элементарных частиц до М. космич. тел (Земли, Солнца, звёзд и др.), а также космич. пространства — объясняет глубокий интерес к М. со стороны мн. наук (физики, астрофизики, геофизики, химии, биологии, геологии и др.) и его широчайшее применение в технике.

### Магнетизм веществ

Макроскопич. проявления М. веществ рассматриваются в рамках теории эл.-магн. поля (см. *Максвелла уравнения*), *термодинамики* и *статистической физики*. Одной из осн. макрохарактеристик магнетика, определяющей его термодинамич. состояние, является вектор намагниченности  $M$  (суммарный магн. момент единицы объёма вещества) — ф-ция  $H$  и темп-ры  $T$ . Зависимость  $M(H, T)$  (см. *Намагничивания кривые*) имеет разл. вид у разных магнетиков. В ряде случаев эта связь линейна:  $M = \chi H$ , где  $\chi$  — *магнитная восприимчивость* единицы объёма вещества (для диамагнетиков  $\chi < 0$ , для парамагнетиков  $\chi > 0$ ). Для ФМ зависимость  $M(H, T)$  нелинейна и неоднозначна (см. *Гистерезис магнитный*);  $\chi$  у ФМ зависит не только от  $T$  и свойств вещества, но также от  $H$  и магн. предистории. В термодинамике  $M$  определяется через *потенциал термодинамический*  $\Phi(H, T, P)$  по ф-ле  $M = -(\partial\Phi/\partial H)_{T, P}$  ( $P$  — давление).

Из общих положений классич. статистич. физики и электродинамики следует, что электронные системы не могут обладать устойчивым магн. моментом (*Бора — ван Ливен теорема*), что противоречит опыту. Квантовая механика, объяснившая устойчивость атомов, объяснила и существование устойчивых магн. моментов у атомов и макротел. М. электронной оболочки атомов и атомных ядер обусловлен спиновыми и орбитальными магн. моментами электронов и нуклонов (см. *Атом, Ядро атомное и Магнетизм микрочастиц*). У одноатомных оболочек инертных газов (He, Ne, Ar и др.) электронные оболочки магнитно-нейтральны, и эти газы являются диамагнетиками (ДМ). Электронная оболочка атомов

щелочных металлов (Li, Na, K и др.) в невозбуждённом состоянии обладает лишь спиновым магн. моментом валентного электрона ( $s$ -состояние, орбитальный магн. момент = 0). Т. о., атомы этих веществ парамагнитны. У атомов переходных  $d$ -металлов (Fe, Co, Ni и др.  $3d$ -,  $4d$ - и  $5d$ -хим. элементы), редкоземельных  $4f$ -металлов (РЗМ), актиноидов (U и др.) и трансуранов не достроены внутренние  $d$ - и  $f$ -слои электронных оболочек. Спиновые и орбитальные магн. моменты электронов этих слоёв не скомпенсированы (*Хунда правило*), что приводит к существованию у атомов и ионов этих хим. элементов спонтанных магн. моментов.

Магн. свойства веществ определяются природой атомных носителей М. и характером их взаимодействий: вещество одного хим. состава в зависимости от внеш. условий, кристаллич. и фазовой структуры, степени атомного порядка в сплаве и т. п. может обладать разл. магн. свойствами. Более простая картина реализуется в газах и (в определённой степени) в кристаллич. и аморфных *диэлектриках*. Однако в проводниках (металлах и сплавах) всё усложняется из-за наличия в них коллективизиров. электронов (бывших валентных), к-рые сами являются источниками М. В переходных металлах из-за взаимодействия коллективизиров. электронов с магн. моментами  $d$ - и  $f$ -оболочек (а также взаимодействия между этими самыми оболочками из-за перекрытия волновых ф-ций соседних атомов, что имеет место гл. обр. для  $d$ -оболочек) нарушается строгая атомная локализация электронов этих оболочек, возникает гибридизация  $s$ - и  $d$ ,  $f$ -состояний (см. *Гибридизация атомных орбиталей*). В результате атомные магн. моменты, особенно  $d$ -оболочек, оказываются изменёнными по сравнению с моментами изолиров. атомов. Т. о., в металле магн. момент иона обусловлен самим ионом и окружающим его облаком коллективизиров.  $s$ -электронов, а также, по крайней мере, частично  $p$ -,  $d$ - и даже  $f$ -электроном, намагниченным, как правило, антипараллельно магн. моменту локализованных  $d$ - или  $f$ -оболочек (что может приводить к т. н. экранированию Кондо). Наиб. ярко это проявляется при очень низких темп-рах и в сильно разбавленных растворах магн. ионов в диамагн. матрице — при  $T < T_K$ , где  $T_K$  — темп-ра Кондо. При  $T > T_K$  экранирование разрушается.

В случае более концентриров. растворов или чистых  $d$ -металлов сами  $d$ -электроны могут быть полностью или частично коллективизированы и представление о локализованном магн. моменте либо вообще теряет смысл, либо требует специального рассмотрения. Здесь имеет место М. коллективизиров. электронов, в к-ром надо учитывать два эффекта: 1) обменный, обусловленный *Паули принципом*, — электроны с параллельными спинами располагаются на больших взаимных расстояниях, чем с антипараллельными, а между ними возникают *обменные дырки* (или дырки Ферми), что уменьшает эл.-статич. энергию их взаимодействия (в изолиров. атомах это объясняет правило Хунда); 2) динамич. корреляционный: кулоновское отталкивание стремится удалить электроны друг от друга (независимо от ориентации их спинов), что создаёт т. н. *корреляционные дырки* (см. *Корреляционная энергия*). Уменьшение энергии электронов из-за этих эффектов приводит к росту их фермиевской кинетич. энергии. В результате конкуренции двух видов энергий в системе электронов устанавливается равновесие (см. ниже). Необходимо также учитывать детали кривых плотности состояний электронов вблизи *ферми-поверхности* (ферми-уровня) и *спиновые флуктуации*. На магн. моменты  $d$ - и  $f$ -оболочек оказывает также сильное влияние эл.-статич. взаимодействие окружающих ионов матрицы (лигандов), к-рое иногда может радикально изменить магн. состояние ионов (см. *«Замагничивание» орбитальных моментов*).

Количественно взаимодействие между атомными носителями М. в веществе можно охарактеризовать ве-