

электронной оболочкой, обладающей наведённым магн. моментом. Искусств. усиление ядерного П. достигается методами динамич. поляризации ядер (см. *Ориентированные ядра, Оверхаузера эффект*).

Коллективные эффекты. Взаимодействия между парамагн. микрочастицами наиб. существенны в твёрдых телах. Они приводят к замене *Кюри закона* на *Кюри — Вейса закон* $\chi = C/(T - \theta)$, где параметр θ по порядку величины соответствует энергии взаимодействия. Знак θ положительн, если при охлаждении парамагнетика до *Кюри точки* возникает ферромагнетизм (Fe, Co, Ni и др.), и отрицателен, если при охлаждении до *Нееля точки* вещество становится антиферромагнитным (напр., Dy, MnO, FeSO₄). В концентриров. парамагнетиках, где магн. частицы образуют осн. решётку вещества, гл. роль играют *обменные взаимодействия*, стремящиеся ориентировать соседние магн. моменты параллельно либо антипараллельно друг другу. В разбавленных парамагнетиках — твёрдых растворах магн. ионов в диамагн. матрицах — преобладают магн. *диполь-дипольные взаимодействия*, знак к-рых зависит от относит. расположения магн. частиц. В этом случае, а также при конкуренции ферро- и антиферромагн. обмена, охлаждение парамагнетика может породить состояние *спинового стекла*.

Близко расположенные примесные магн. центры, связанные сильным обменным взаимодействием, иногда образуют *суперпарамагн. кластеры*, обладающие увеличенным магн. моментом (обменно-усиленный П.). Макроскопич. аналог таких систем — суспензия мелких ферромагн. частиц в жидких или твёрдых растворителях (см. *Суперпарамагнетизм, Магнитные жидкости*). К резкому усилению П. ведут и обменные взаимодействия электронов проводимости в нек-рых металлах (напр., в Pd и его сплавах).

Релаксационные и динамические явления. Намагничивание парамагнетика в поле H происходит в результате процессов продольной и поперечной релаксации. Первая устанавливает равновесное значение проекции M на направление H , вторая ведёт к затуханию нестационарной ортогональной компоненты намагниченности. Продольная релаксация обусловлена взаимодействием микроскопич. магн. моментов с тепловым движением среды. Время продольной релаксации τ_1 обычно составляет 10^{-10} — 10^{-4} с при 300 К и растёт с понижением темп-ры. Время поперечной релаксации τ_2 в парамагн. металлах и жидкостях мало отличается от τ_1 , однако в твёрдых диэлектриках, как правило, $\tau_2 \ll \tau_1$. В последнем случае поперечная релаксация обусловлена взаимодействиями в системе микроскопич. магн. моментов и ведёт к установлению в ней внутр. квазиравновесия, характеризуемого, в общем, двумя *спиновыми температурами*. Одна из них служит мерой упорядоченности моментов μ во внеш. поле H , а другая — мерой их взаимной упорядоченности (ближнего порядка).

Процессы магн. релаксации существенно влияют на динамич. восприимчивость парамагнетика $\chi(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$ — комплексную величину, характеризующую линейный отклик намагниченности на малое гармонич. изменение внеш. поля с частотой ω . Типичные частотные зависимости компонент продольной восприимчивости $\chi_i(\omega)$, измеряемой в направлении H , показаны на рис. 2. Дополнит. особенности на этих кривых могут возникать от вклада т. н. адабатич. восприимчивости, к-рая связана с взаимодействиями между магн. моментами. Кривые $\chi(\omega)$ исполь-

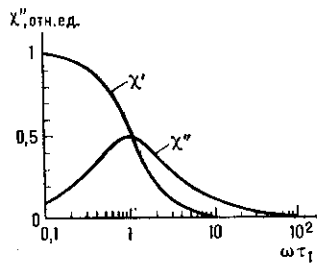


Рис. 2. Типичная частотная зависимость продольной динамической восприимчивости χ_i парамагнетика.

зуются для измерения времён магн. релаксации (метод Гортера). Поперечная по отношению к H динамич. восприимчивость $\chi_{\perp}(\omega)$ обнаруживает резонансные пики на высоких частотах, соответствующих расщеплению уровней энергии в магн. поле (см. *Магнитный резонанс*). Воздействие на твёрдый парамагнетик поперечным ВЧ-полем вблизи резонанса может усиливать ближний порядок в парамагнитной системе, что в свою очередь ведёт к росту $\chi_{\parallel}(\omega)$ (эффект усиленной восприимчивости).

Изучение П. статич. и динамич. методами даёт ценную информацию о магн. моментах частиц, их энергетич. спектрах и взаимодействиях, о тонких деталях внутр. структуры веществ. П. используется в методах *магнитного охлаждения* до сверхнизких темп-р, в квантовой электронике (см. *Мазер*) и др. См. также *Электронный парамагнитный резонанс, Ядерный магнитный резонанс*.

Лит.: Вонсовский С. В., *Магнетизм*, М., 1971; Криччик Г. С., *Физика магнитных явлений*, 2 изд., М., 1985; Альтшулер С. А., Козырев Б. М., *Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп*, 2 изд., М., 1972; Абрагам А., Гольдман М., *Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок*, пер. с англ., т. 1—2, М., 1984. В. А. Азаркин.

ПАРАМАГНЕТИК — магнетик с преобладанием *парамагнетизма* и отсутствием магнитного атомного порядка. П. намагничивается в направлении внеш. магн. поля, т. е. имеет положит. *магнитную восприимчивость*, к-рая в слабом поле при не очень низкой темп-ре (т. е. вдали от условий магн. насыщения или проявления *Де Хааза — ван Альфена эффекта*) не зависит от напряжённости поля. Поскольку свободная энергия П. понижается в магн. поле, при наличии градиента поля он вытягивается в область с более высоким значением напряжённости магн. поля. Конкуренция диамагнетизма, появление дальнего магн. порядка или сверхпроводимости ограничивают область существования вещества в парамагн. состоянии.

П. содержит по крайней мере один из перечисленных ниже типов носителей парамагнетизма.

а) Атомы, молекулы или ионы с нескомпенсиров. *магнитными моментами* в основном или возбуждённом состоянии с энергией возбуждения $\epsilon_i \ll kT$. П. этого типа обладают ориентац. ланжевенским парамагнетизмом, зависящим от темп-ры T по *Кюри закону* или *Кюри — Вейса закону*, в них возможно магн. упорядочение. [Похожий по проявлениям магнетизм неоднородных систем малых ферро- или ферримагн. однодоменных частиц (кластеров) в жидкостях или твёрдых матрицах выделен в особый вид — *суперпарамагнетизм*.]

Этот тип носителей присутствует в парах металлов нечётной валентности (Na, Tl); в газе молекул O₂ и NO; в нек-рых органич. молекулах со свободными радикалами; в солях, окислах и др. диэлектрич. соединениях 3d-, 4f- и 5f-элементов; в большинстве редкоземельных металлов.

б) Те же частицы, имеющие орбитальный магн. момент в возбуждённом состоянии с энергией возбуждения $\epsilon_i \gg kT$. Для таких П. характерен не зависящий от температуры поляризационный *ванфлековский парамагнетизм*.

Этот тип носителей парамагнетизма проявляется в нек-рых соединениях d- и f-элементов (соли Sm и Eu и др.).

в) Коллективизиров. электроны в частично заполненных энергетич. зонах. Им присущ сравнительно слабо зависящий от темп-ры спиновый *Паули парамагнетизм*, как правило, усиленный межэлектронными взаимодействиями. В d-зонах спиновый парамагнетизм сопровождается заметным ванфлековским парамагнетизмом.

Подобный тип носителей преобладает в щелочных и щёлочноземельных металлах, d-металлах и их интерметаллич. соединениях, актиноидах, а также в хорошо