

ктронов, атомных ядер, парамагн. атомов и ионов. Энергия С.-с. в. зависит от взаимной ориентации спинов этих частиц. Благодаря своей релятивистской природе С.-с. в., как правило, значительно слабее др. взаимодействий (электростатических, обменных и др.), определяющих структуру энергетич. уровней атомных и молекулярных систем. Поэтому С.-с. в. определяет обычно лишь малое расщепление или уширение спектральных линий (см. Радиоспектроскопия, Спектроскопия). В простейших случаях величина С.-с. в. определяется диполь-дипольным взаимодействием спиновых магнитных моментов  $\mu_i, \mu_j$  частиц  $i, j$  и имеет энергию порядка  $\mathcal{E}_{ij} \sim \mu_i \mu_j / r^3$ , где  $r$  — расстояние между частицами. Для типичных атомных масштабов величина  $\mathcal{E}_{ij}$  оказывается порядка  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ ,  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  и  $10^{-11}$  эВ соотв. для электрон-электронного, электронно-ядерного и ядерно-ядерного взаимодействий.

Электрон-электронное С.-с. в. в свободных атомах и ионах приводит лишь к малому сдвигу энергетич. уровней, не вызывая их расщепления. В молекулах, где центр симметрии нарушен, такие расщепления возникают и дают вклад в мультиплетную тонкую структуру спектров (т. в.  $\Sigma$ -уровни; см. Молекула). Аналогичный эффект возникает и при понижении симметрии во внутрискристаллическом поле твёрдого тела.

Электронно-ядерное С.-с. в. между орбитальными электронами атома (иона, молекулы) и обладающим спином ядром атома приводит к сверхтонкой структуре спектров, обусловленной зависимостью энергии атома от ориентации ядерного спина  $I$  в магн. поле, созданном суммарным спином электронов  $S$  (см. Сверхтонкое взаимодействие). Аналогичная сверхтонкая структура наблюдается и в спектрах электронного парамагнитного резонанса, где она обусловлена С.-с. в. неспаренных электронов парамагн. центров (см. Парамагнетизм) как с их соотв. ядрами, так и с ядрами ближайших соседей (суперсверхтонкая структура).

В электронных парамагнетиках С.-с. в. между парамагн. центрами в значит. степени определяет форму и ширину линий ЭПР. В этом случае принято понимать термин «С.-с. в.» более широко: кроме магнитной (диполь-дипольной) энергии к нему относят и обменное взаимодействие, к-рое также зависит от взаимной ориентации спинов и формально рассматривается как «псевдодипольное».

С.-с. в. между ядрами атомов, входящих в кристаллич. решётку твёрдого тела, определяет форму линий ядерного магнитного резонанса и даёт информацию о структуре вещества и внутр. атомно-молекулярных движениях. В жидкостях быстрое тепловое движение атомов и молекул приводит к тому, что анизотропная часть ядерно-ядерного С.-с. в., усредняясь, уменьшается практически до нуля. Это ведёт к резкому сужению линий и повышению разрешающей способности ЯМР. Сходных результатов можно достигнуть и в твёрдых телах за счёт быстрого вращения образца либо с помощью спец. радиочастотных полей, заставляющих ядерные спины быстро менять свою ориентацию. Косвенное ядерное С.-с. в., обусловленное очень слабым взаимодействием ядерных спинов  $I_i$  и  $I_j$  через общую электронную систему молекулы, носит изотропный характер и поэтому не усредняется. Оно образует малые ( $\sim 1$  Гц) мультиплетные расщепления в спектрах ЯМР высокого разрешения. Эти расщепления не зависят от величины внеш. магн. поля и могут быть использованы для классификации и структурного анализа сложных молекул и их фрагментов.

С.-с. в. играет важную роль в динамике многочастичных спиновых систем. Оно приводит к взаимным переворотам взаимодействующих спинов (электронных либо ядерных), что обеспечивает процессы поперечной релаксации магнитной, спиновой диффузии и ведёт к установлению спиновой температуры в парамагн. твёрдых телах. С.-с. в. между электронами

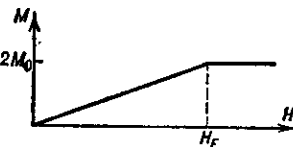
парамагн. центров и окружающими ядрами определяет, кроме того, процессы магн. релаксации и динамич. поляризации ядер (см. Оверхаузера эффект).

В магнитоупорядоченных веществах (ферро- и антиферромагнетиках) С.-с. в., наряду с внутрискристаллич. полем, даёт вклад в магнитную анизотропию, играет решающую роль в образовании магнитной доменной структуры. Существуют также соединения (в основном с участием редкоземельных элементов), магн. упорядочение в к-рых вообще обусловлено не обменным, а дипольным С.-с. в. (дипольные магнетики).

Лит.: 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; Лундквист А. Г., Федин Э. И., ЯМР-спектроскопия, М., 1986.

**СПИН-ФЛИП ПЕРЕХОД** (от англ. flip — щёлкать, хлопнуть; «схлопывание» магнитных подрешёток) — магнитный фазовый переход в сильном магн. поле, при к-ром разрушается антиферромагнетизм. При наложении возрастающего внеш. магн. поля перпендикулярно направлению лёгкого намагничивания антиферромагн. кристалла векторы намагниченности магнитных подрешёток кристалла начинают поворачиваться к направлению поля и в очень сильном поле (критич. магн. поле  $H_{c2} \approx H_E$ , где  $H_E$  — эфф. поле обменного взаимодействия ионов) все магн. моменты ионов антиферромагнетика ориентируются вдоль поля (намагниченности подрешёток «схлопываются»). Антиферромагн. кристалл становится по существу ферромагнитным (рис. 1). Раз-

рушение антиферромагнетизма происходит, когда магн. энергия подрешёток во внеш. поле сравнивается с энергией обменного взаимодействия ионов. Эффективное обменное поле  $H_E$ , являющееся критич. полем С.-ф. п., разрушающим антиферромагнетизм, определяется из условия  $kT_N = \mu H_E$ , где  $T_N$  — темп-ра Нееля,  $\mu \approx M_0/N$  — величина порядка атомного магн. момента,  $M_0$  — намагниченность насыщения магн. подрешётки.



рушение антиферромагнетизма происходит, когда магн. энергия подрешёток во внеш. поле сравнивается с энергией обменного взаимодействия ионов. Эффективное обменное поле  $H_E$ , являющееся критич. полем С.-ф. п., разрушающим антиферромагнетизм, определяется из условия  $kT_N = \mu H_E$ , где  $T_N$  — темп-ра Нееля,  $\mu \approx M_0/N$  — величина порядка атомного магн. момента,  $M_0$  — намагниченность насыщения магн. подрешётки.

Температурная зависимость критического поля для  $MnV_2 \cdot H_2O$  ( $T_N \approx 2,3$  К).

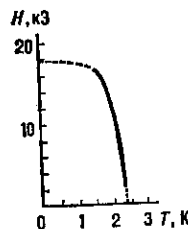


рис. 2. Температурная зависимость критического поля для  $MnV_2 \cdot H_2O$  ( $T_N \approx 2,3$  К).

$N$  — полное число узлов в кристаллич. решётке антиферромагнетика. При абс. нуле темп-ры обменная энергия по порядку величины равна  $kT_N$ . С ростом темп-ры величина обменного поля, а следовательно и критич. поле «схлопывания» подрешёток, уменьшается, обращаясь в нуль при  $T = T_N$  (рис. 2). С.-ф. п. представляет собой, как правило, фазовый переход 2-го рода.

Лит.: Боровик-Романов А. С., Антиферромагнетизм, в сб.: Итоги науки. Сер. Физ.-мат. науки, в. 4, М., 1962; Вонсовский С. В., Магнетизм, М., 1971. А. М. Надомцева.

**СПИН-ФЛОП ПЕРЕХОД** (от англ. flop — шлёпнуться, плюхнуться; «прокидывание» подрешёток) — магнитный фазовый переход, наблюдаемый в антиферромагнетиках при достаточно большом (критич.) значении внеш. магн. поля  $H_{c1}$ , приложенного вдоль оси антиферромагнетизма, при к-ром направление намагниченности магнитных подрешёток поворачивается перпендикулярно ориентации поля  $H_{c1}$  (см. Антиферромагнетизм).