

личной энергии этого взаимодействия $\epsilon_{вз}$, рассчитанной на отд. пару частиц — носителей магн. момента. Энергию $\epsilon_{вз}$ сопоставляют с энергией частицы, имеющей магн. момент $\sim \mu_B$ (см. *Магнетон*) в нек-ром эффективном магн. поле $H_{эф}$, т. е. с $\epsilon_H = \mu_B H_{эф}$, и со ср. энергией теплового движения частицы при нек-рой критич. темп-ре $T_{кр}$, т. е. с $\epsilon_T = kT_{кр}$. При $H < H_{эф}$ и $T < T_{кр}$ будут сильно проявляться магн. свойства вещества, определяемые внутр. взаимодействиями атомных носителей M . (т. н. кооперативный или «сильный» M . веществ). Наоборот, при $H \gg H_{эф}$ или $T > T_{кр}$ доминируют внеш. факторы (H и T), подавляющие эффект внутр. взаимодействия $\epsilon_{вз}$ (т. н. некооперативный, или «слабый», M . веществ). Для полного выяснения природы M . веществ надо знать физ. генезис $\epsilon_{вз}$ и характер атомных магн. носителей M . Если не рассматривать ядерный M ., то в электронных оболочках атомов и молекул, а также в электронной системе веществ действуют два типа сил — электрич. и магнитные. Мерой первых является эл.-статич. энергия двух электронов на расстоянии порядка размера атома ($a \sim 10^{-8}$ см): $\epsilon_{эл} \sim e^2/a \sim 10^{-11}$ эрг. Мерой магн. взаимодействий является энергия связи двух атомных магн. моментов на расстоянии a , т. е. $\epsilon_m \sim \mu_B^2/a^3 \sim 10^{-15}$ эрг. Т. о., $\epsilon_{эл} > \epsilon_m$ на 4 порядка. Поэтому сохранение ферромагнетизма, напр. у Fe, Co и Ni до $T_{кр} \sim 1000$ К, может быть обусловлено только электрич. взаимодействием, т. к. ϵ_m способно обеспечить ФМ лишь до $T_{кр} \sim 1$ К.

Можно рассматривать ϵ_m как малое возмущение по сравнению с $\epsilon_{эл}$. Однако у хим. элементов с большой атомной массой — у РЗМ и актиноидов — магн. моменты атомов достигают $\sim 10\mu_B$, и поэтому ϵ_m возрастает в них на 2 порядка. Согласно квантовой механике (в силу принципа Паули), наряду с квазикулоновским эл.-статич. взаимодействием электронов существует чисто квантовое эл.-статич. *обменное взаимодействие*, зависящее от взаимной ориентации спиновых моментов электронов. Это эл.-статич. по своему генезису взаимодействие $\epsilon_{об}$ оказывает существ. влияние на магн. состояние электронных систем. В частности, оно благоприятствует атомному магн. порядку. Верхний предел $\epsilon_{об} \sim 10^{-13}$ эрг. Если M . некооперативный, то магн. порядок устанавливается лишь внеш. полем $H_{вн}$, а магн. беспорядок — темп-рой. В случае кооперативного M . роль обменного взаимодействия превалирует, а поле $H_{вн}$ лишь помогает обнаружить внутр. магн. порядок. Положит. знак $\epsilon_{об} > 0$ способствует параллельной ориентации атомных магн. моментов, т. е. ферромагнетизму. При $\epsilon_{об} < 0$ имеет место тенденция к антиферромагн. упорядочению. В некоторых случаях возможно так называемое смешанное обменное взаимодействие, когда для различных соседних магнитных атомов энергия $\epsilon_{об}$ меняет знак.

В веществах различают обменную связь двух типов: 1) прямой обмен между двумя соседними магн. ионами, когда их волновые функции сильно перекрываются. В этом случае взаимодействие короткодействующее, экспоненциально убывающее с расстоянием между ионами. Для двух электронов в одной атомной оболочке всегда $\epsilon_{об} > 0$, и поэтому атомы d -металлов, РЗМ и актиноидов всегда имеют спонтанный магн. момент. В общем случае для соседних ионов в веществе $\epsilon_{об}$ может быть как > 0 так и < 0 (в зависимости от их электронной структуры). 2) Непрямой обмен между удалёнными магн. ионами, когда практически нет перекрытия их волновых ф-ций и связь осуществляется промежуточными агентами (в диэлектриках и полупроводниках это *косвенное обменное взаимодействие* через немагн. ион-лиганд, находящийся между двумя магн. ионами, а в металлич. системах связь, напр. между соседними f -слоями, осуществляется электронами проводимости (см. *РККИ-обменное взаимодействие*). Обменное взаимо-

действие этого типа — дальнедействующее ($\sim r^{-3}$) и осциллирующее с переменной знака.

Изложенное позволяет провести физ. классификацию магн. свойств веществ.

Некооперативный магнетизм слабодействующих магнитных частиц ($\epsilon_{об} \ll \mu_B H$ и $\epsilon_{об} \ll kT$). Преобладание диамагнетизма. К веществам этого класса относятся: а) все инертные газы; все газы, атомы и молекулы k -рых не имеют спонтанных магн. моментов. У них $\chi < 0$, очень мала по абс. величине (молярная восприимчивость $\chi \sim -10^{-7} \div -10^{-5}$) и от T практически не зависит; б) органич. соединения с неполярной связью, в k -рых молекулы или радикалы не имеют магн. момента или у них парамагнетизм подавлен диамагнетизмом; у таких веществ восприимчивость $\chi \sim -10^{-6}$, практически не зависит от T , но обладает заметной анизотропией; в) нек-рые металлы (Cu, Zn, Au, Hg, и др.), растворы, сплавы и хим. соединения (напр., галлоиды), в k -рых ионные остовы (Li^+ , Be^{2+} , Al^{3+} , Cl^- и др.) подобны атомам инертных газов, в связи с чем они обладают диамагнетизмом.

Преобладание парамагнетизма характерно для: 1) веществ, у k -рых атомы (ионы, молекулы) обладают магн. моментом. К ним относятся газы (O_2 , NO) и пары щелочных и переходных металлов со значениями $\chi \sim 10^{-3} \div 10^{-5}$. При не очень низких T и в не очень сильных полях ($\mu_B H/kT \ll 1$) χ не зависит от H , но существенно зависит от T : $\chi = C/T$ (*Кюри закон*), C — постоянная Кюри; в сильных магн. полях и при достаточно низких T у этих веществ наблюдается магн. насыщение; 2) ионов переходных элементов в жидкой фазе, в кристаллич. и аморфных соединениях при слабом взаимодействии ионов друг с другом и изотропном атомном окружении. При $\mu_B H \ll kT$ их магн. восприимчивость χ не зависит от H , а их зависимость от T описывается *Кюри — Вейса законом*: $\chi = C'/(T - \theta_{пм})$, где C' — постоянная, а $\theta_{пм}$ — парамагнитная точка Кюри, характеризующая взаимодействие магн. ионов, т. е. в этом случае проявляется уже нек-рый кооперативный характер парамагнетизма; 3) ферромагнетиков и антиферромагнетиков выше точек Кюри и Нельса (T_C и T_N).

Особо следует выделить ряд специфич. магн. состояний веществ. Так, ниже нек-рой критич. темп-ры $T_{сп}$ в кристаллич. и аморфных парамагнетиках может возникнуть *сперомагнетизм*, для k -рого характерна «замороженность» магн. моментов ионов в произвольных направлениях (равновероятно по всем направлениям), причём магн. моменты не испытывают флуктуаций ориентации, как в идеальных парамагнетиках. Модификацией подобного магн. состояния является идеальное *спиновое стекло*, осн. признаком k -рого является максимум на кривой $\chi(T)$ при темп-ре замерзания спинового стекла $T_{сс}$. Наиболее типичные спиновые стёкла — разбавленные растворы атомов d -металлов в диамагнитной матрице (Cu, Au и др.) в определ. интервале концентраций C (между $C_{мин}$ — пределом разбавления и $C_{макс}$ — пределом протекания). При $C < C_{мин}$ магн. ион полностью экранирован электронами проводимости матрицы от взаимодействия с др. магн. ионами и магн. упорядочение отсутствует. При $C > C_{макс}$ возникает кооперативный ФМ или АФМ. В спиновых стёклах магн. ионы связаны либо РККИ-обменом (положительным или отрицательным), либо чисто антиферромагн. взаимодействием [здесь могут быть случаи, когда магн. момент со своими соседями связан обменными взаимодействиями противоположных знаков, что может привести к структурной неравновесности (*фрустрация*) и, как следствие, к магн. гистерезису]. Если в спиновом стекле при росте C возникают локальные корреляции ионов — двух-, и трёх- и многоионные кластеры, связанные прямым обменом в единое образование, внедрённое в немагн. матрицу, то при $T < T_{сс}$ это кооператив-