

Это же относится и к остальным типам С. [2]. Так, *спиновое стекло* (регулярный аналог — *антиферромагнетик*) возникает в твердотельных системах с неупорядоченным расположением магн. атомов (первичный беспорядок). В отношении трансляц. порядка система может быть как кристаллической (напр.,  $Cu_{1-x}Mn_x$ ,  $x < 1$ ), так и аморфной ( $\alpha = AlGd$ ) [2,3,4].

Дипольные С. возникают в системах с неупорядоченно расположенными диполями (как магнитными, так и электрическими). В непроводящих *твёрдых растворах* с редко расположенными магн. атомами (напр.,  $LiHo_xY_{1-x}F_4$  при  $x \ll 1$ ) магнитное *обменное взаимодействие* мало и определяющим становится магн. дипольное взаимодействие. Его знакопеременный характер и случайность в пространственном расположении диполей приводят к образованию магн. дипольного С. В металлич. твёрдых растворах с малой концентрацией магн. атомов переходных металлов (напр.,  $Cu_{1-x}Mn_x$ ,  $x \ll 1$ ) роль знакопеременного взаимодействия играет *РККИ-обменное взаимодействие* (через электроны проводимости).

Аналогичная ситуация возникает в электрических дипольных С., напр. в соединениях типа  $K(Ta_{1-x}Z_x)O_3$ , где  $Z = Nb, Li, Na$ ;  $x \ll 1$ . В элементарной ячейке  $KTaO_3$  есть неск. эквивалентных децентральных положений, в к-рых может оказаться примесь замещения  $Z$ , создавая при этом локальный дипольный момент. При низких темп-рах электрич. дипольное взаимодействие приводит к «замораживанию» диполей (атомов  $Z$ ) в неупорядоченном состоянии. Если концентрация примеси в веществе (матрице) мала ( $x \sim 0,05-0,1$ ), то определяющую роль играет короткодействующее взаимодействие между диполями (возникающее из-за большой поляризуемости матрицы). Оно приводит к переходу веществ в регулярную сегнетоэлектрич. фазу (см. *Сегнетоэлектрики*).

Соединение  $(KCN)_x(KBr)_{1-x}$  при  $x \sim 0,5$  представляет собой пример электрич. квадрупольного (ориентационного) С. Определяющим здесь является взаимодействие случайно расположенных одноосных молекул CN через поле упругих напряжений в матрице, являющиеся квадрупольным (при более низких темп-рах возможно образование дипольного С. за счёт слабого дипольного взаимодействия молекул CN). Квадрупольным С. является также твёрдый раствор орто- и пара-водорода при концентрации  $x < 0,56$  ортомолекул  $H_2$ , к-рые за счёт формы обладают электрич. квадрупольным моментом; при больших  $x$  реализуется фаза с дальним порядком трансляц. и ориентац. типов.

Протонным С. называется низкотемпературное состояние, возникающее в смешанных кристаллах  $Rb_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$ . Чистые кристаллы  $RbH_2PO_4$  (RDP) и  $NH_4H_2PO_4$  (ADP) являются членами той же семейства KDP ( $KH_2PO_4$ ) и имеют одинаковые решётки с близкими параметрами, причём RDP при низких темп-рах является сегнетоэлектриком, а ADP — *анти-сегнетоэлектриком*. Смешанные кристаллы  $KDP(1-x)(ADP)_x$  в интервале  $0,22 < x < 0,8$  обладают неупорядоченным состоянием, характеризующимся замораживанием движения протонов на водородных связях.

Сверхпроводниковое С. может образовываться в т. н. гранулиров. сверхпроводниках, помещённых в магн. поле  $H \geq \Phi_0/l^2$ , где квант магн. потока  $\Phi_0 = hc/4e$ , а  $l$  — характерный масштаб неоднородности системы (порядка или больше ср. расстояния между центрами гранул). Такие сверхпроводники состоят из гранул сверхпроводящего вещества, помещённых в несверхпроводящую матрицу и связанных между собой туннельными (джозефсоновскими) контактами. Сверхпроводящие С. характеризуются замороженным неупорядоченным распределением джозефсоновских токов через межгранульные контакты; роль «первичного» беспорядка играет случайность в расположении гранул, приводящая к случайному распределению величин магн. потоков в пространстве между гранулами.

В слабом магн. поле  $H \ll \Phi_0/l$  гранулиров. системы ведут себя как обычные *сверхпроводники второго рода*. Регулярным аналогом является обычная сверхпроводящая фаза с *решёткой вихрей Абрикосова* [3].

Основным наблюдаемым признаком перехода системы в состояние С. является резкое замедление релаксации возмущений при понижении темп-ры (см. *Кооперативные явления*). Так, сдвиговая вязкость  $\eta$  позиционных С. возрастает более чем на 12 порядков с приближением к точке замерзания, причём её поведение часто описывается эмпирич. законом Фегеля — Фулчера:

$$\eta \sim \exp[\epsilon_0/(T - T_0)], \quad (1)$$

где  $\epsilon_0, T_0$  — параметры, получаемые экспериментально. Условно точкой замерзания  $T_f$  считают темп-ру, при к-рой  $\eta$  достигает  $10^{15}$  пуаз ( $T_f > T_0$ ). Аналогично замедление магн. релаксации наблюдается в спиновых С., в к-рых макс. время релаксации

$$\tau_{\max} \sim (T - T_f)^{-\alpha},$$

где  $\alpha \approx 7-9$ .

В состоянии С. ( $T < T_f$ ) релаксация возмущений происходит медленно и в широком интервале времён может быть описана как логарифмич. зависимость параметра порядка от времени. Др. важнейшим свойством С. является зависимость его характеристик от истории. Приведённые свойства С. свидетельствуют о наличии широкого спектра времён релаксации, граница к-рого больше времени наблюдения. Для С., обладающих замороженным первичным беспорядком, вопрос о конечности или бесконечности  $\tau$  связан с вопросом (не имеющим пока общего решения) о существовании фазового перехода в состояние С. Фазовый переход экспериментально наблюдается для большинства спиновых С. При этом вблизи точки замерзания  $T_f$  имеет особенность не только температурная зависимость времени релаксации  $\tau(T)$ , но и (при воздействии внеш. полей) обобщённая восприимчивость  $\chi(T)$ . В пост. поле ф-ция  $\chi(T)$  имеет, как правило, излом в точке  $T = T_f$ . В перем. поле частоты  $\omega$  особенности имеют  $Re \chi(T)$  и  $Im \chi(T)$ . Кроме того,  $T_f$  зависит от  $\omega$ . В области низких частот особенности  $\chi(\omega)$  связаны с наличием в С. шума со спектром  $1/\omega$ .

Количественная теория С. пока не построена. Одной из качественных концепций является понятие *фрустрации* [2-3]. Статистич. система наз. *фрустрированной*, если взаимодействия между её разл. элементами конкурируют, т. е. предъявляют несовместимые требования к локальной структуре, соответствующей минимуму свободной энергии. Простейшие примеры фрустрированной системы — квадратная ячейка спинов с одним положительным обменным интегралом  $J > 0$  и тремя отрицат. интегралами  $J < 0$  или треугольная ячейка спинов со всеми  $J < 0$ . В результате компромисса возникает принципиально новое состояние, к-рое при наличии первичного беспорядка оказывается С. Пример позиционных С. показывает, что наличие первичного беспорядка не является обязательным, его роль может сыграть флуктуационно возникшая неоднородность, замороженная при быстром охлаждении. Фрустрация в случае металлич. С. обеспечивается тем, что локальная энергетически выгодная конфигурация атомов имеет икосаэдрич. симметрию, к-рая не может быть реализована в трёхмерной периодич. решётке. Иногда это приводит к образованию *квазикристаллов*, обладающих дальним ориентац. порядком при отсутствии трансляционного, в др. случаях возникает С. В магн. и электрич. С. осн. источником фрустрации является конкуренция ферро- и антиферромагн. взаимодействий; кроме того, фрустрация может возникнуть и при чисто антиферромагнитном взаимодействии, напр. в треугольной или кубической гранулярной кристаллич. решётках. Неупорядоченная спиновая система, не обладающая фрустрацией, обычно является не С., а, напр., простым *ферромагнетиком*.