



КОСВЕННОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Авторы: В. Ю. Ирхин

КОСВЕННОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, обменное взаимодействие, возникающее между магнитными моментами локализованных электронов через возмущение др. электронной подсистемы: диамагнитных ионов (лигандов), окружающих магнитные ионы в [магнитных диэлектриках](#), либо электронов проводимости в магнитных металлах и легированных полупроводниках. Для объяснения магнитных свойств всех этих веществ прямое обменное взаимодействие Гейзенберга – Дирака, как правило, оказывается слишком слабым.

Нидерл. физик Х. А. Крамерс (1934) показал, что обменная связь магнитных ионов, окружённых диамагнитными ионами, может осуществляться через виртуальные возбуждения диамагнитной подсистемы кристалла. Ф. [Андерсон](#) (1950) развил эту идею, применив её к объяснению антиферромагнетизма диэлектрич. соединений переходных

d-металлов типа MnO. Соответствующее сверхобменное взаимодействие (или К. о. в. Крамерса – Андерсона) описывается эффективным гамильтонианом Гейзенберга

$$H = -J_{ij}(\mathbf{S}_i \mathbf{S}_j) \quad ($$

\mathbf{S}_i – операторы локализованных спинов) и включает в себя ферромагнитный потенциальный (электростатический) обмен и антиферромагнитный кинетический обмен. Знак и порядок величины параметров обмена

J_{ij} в зависимости от электронной конфигурации магнитного иона, симметрии кристаллич. окружения и угла между направлениями от лиганда на магнитные ионы i и

j можно определить с помощью полуэмпирических правил Гуденафа – Канамори.

К. о. в. через электроны проводимости было предсказано амер. физиками

М. Рудерманом и Ч. Киттелем (1954) для ядерных спинов в металлах при исследовании сверхтонкого взаимодействия. Теорию К. о. в. между магнитными моментами локализованных электронов через подвижные электроны проводимости развили япон. физики Т. Касуя и К. Иосида (1956–57) на основе $s-d(f)$ -обменной модели Шубина – Вонсовского. Соответствующее взаимодействие Рудермана – Киттеля – Касуи – Иосиды (или РККИ-обменное взаимодействие) формально возникает во втором порядке теории возмущений по малому параметру I – интегралу

$s-d(f)$ -обмена между локализованными электронами и электронами проводимости. Оно обусловлено возмущением спиновой плотности электронов проводимости локализованным моментом, которое воспринимается др. локализованными спинами. РККИ-обменное взаимодействие также имеет гейзенберговский вид, однако, в отличие от сверхобменного взаимодействия, соответствующий интеграл К. о. в. имеет дальнедействующий и осциллирующий характер спада с расстоянием

R :

$$J_{ij} \sim \cos(2k_F R_{ij}) / R_{ij}^3 \text{ при}$$

$$k_F R_{ij} \gg 1, \text{ где}$$

k_F – фермиевский волновой вектор электронов проводимости. Такое поведение обусловлено скачком функции распределения электронов проводимости на ферми-поверхности.

РККИ-обменное взаимодействие играет определяющую роль в разбавленных твёрдых растворах магнитных ионов переходных металлов в немагнитной металлич. матрице (в т. ч. в спиновых стёклах), а также в магнетизме редкоземельных f -металлов и многих их проводящих соединений, задавая их магнитную структуру. В f -системах с тяжёлыми фермионами и т. н. решётках Кондо оно конкурирует с одноузельным Кондо эффектом. Для магнитных d -металлов группы железа и большинства их сплавов справедлива скорее картина зонного магнетизма. Однако в ряде случаев можно говорить о наличии достаточно хорошо определённых локализованных магнитных моментов, взаимодействие между которыми подобно РККИ-взаимодействию.

К. о. в. в легированных магнитных полупроводниках, а также в магнетиках с сильными

корреляциями (узкими зонами проводимости, напр. в манганитах лантана) качественно отличается от РККИ-взаимодействия и имеет существенно негейзенберговский вид, поскольку здесь теория возмущений по параметру I неприменима. Наличие в таких магнетиках небольшого числа носителей тока способствует ферромагнитному упорядочению локализованных магнитных моментов, причём выигрыш в энергии для упорядоченного состояния пропорционален концентрации носителей тока и энергии их переноса (см. [Двойное обменное взаимодействие](#)).

Литература

Лит.: Гуденаф Д. Магнетизм и химическая связь. М., 1968; Вонсовский С. В. Магнетизм. М., 1984; Уайт Р. М. Квантовая теория магнетизма. М., 1985.

Processing math: 100%