

ф-цией  $\Phi_C$ ; это видно из того, что вероятность  $|\Psi|^2 = |\Phi_A|^2 |\chi_C|^2$  нахождения электронов в одной и той же точке ( $r_1 = r_2$ ) для состояния  $\Phi_A$  равна нулю. Поэтому ср. энергия кулоновского взаимодействия (отталкивания) двух электронов оказывается в состоянии  $\Phi_A$  меньшей, чем в состоянии  $\Phi_C$ . Поправка к энергии системы, связанная с взаимодействием электронов, определяется по теории возмущений:

$$E_{вз} = K \pm A, \quad (3)$$

где знаки  $\pm$  относятся соответственно к симметричному и антисимметричному координатным состояниям,

$$K = e^2 \int \frac{|\Psi_n(r_1)|^2 |\Psi_m(r_2)|^2}{|r_1 - r_2|} d\tau_1 d\tau_2, \quad (4)$$

$$A = e^2 \int \frac{\Psi_n^*(r_1) \Psi_m(r_1) \Psi_m^*(r_2) \Psi_n(r_2)}{|r_1 - r_2|} d\tau_1 d\tau_2$$

( $e$  — заряд электрона,  $d\tau = dx dy dz$  — элемент объёма). Величина  $K$  имеет наглядный классич. смысл и соответствует электростатич. взаимодействию двух заряд. «облаков» с плотностями заряда  $e|\Psi_n(r_1)|^2$  и  $e|\Psi_m(r_2)|^2$ . Величину  $A$ , называемую обменным интегралом, можно интерпретировать как электростатич. взаимодействие заряд. «облаков» с плотностями заряда  $e\Psi_n^*(r_1)\Psi_m(r_1)$  и  $e\Psi_m^*(r_2)\Psi_n(r_2)$  (звёздочка означает комплексное сопряжение), т. е. когда каждый из электронов находится одновременно в состояниях  $\Psi_n$  и  $\Psi_m$  (что бессмысленно с точки зрения классич. физики). Из (3) следует, что полная энергия пара- и ортогол. с электронами в аналогичных состояниях отличается на величину  $2A$ . Т. о., хотя непосредственно спиновое взаимодействие мало и не учитывается, тождественность двух электронов в атоме гелия приводит к тому, что энергия системы оказывается зависящей от полного спина системы, как если бы между частицами существовало дополнительное, обменное взаимодействие. Очевидно, что О. в. в данном случае является частью кулоновского взаимодействия электронов и явным образом выступает при приближённом рассмотрении квантовомеханич. системы, когда волновая ф-ция всей системы выражается через волновые ф-ции отд. частиц (в частности, в приближении Хартри — Фока; см. Хартри — Фока метод).

О. в. эффективно проявляется в тех случаях, когда «перекрываются» волновые ф-ции отд. частиц системы, т. е. когда существуют области пространства, в к-рых с заметной вероятностью может находиться частица в разл. состояниях движения. Это видно из выражения для обменного интеграла  $A$ : если степень перекрытия состояний  $\Psi_n^*(r)$  и  $\Psi(r)$  незначительна, то величина  $A$  очень мала.

Из принципа тождественности следует, что О. в. возникает в системе одинаковых частиц даже в случае, если пренебречь, т. е. в идеальном газе тождеств. частиц. Эффективно оно начинает проявляться, когда ср. расстояние  $d$  между частицами становится сравнимым (или меньшим) с длиной волны де Бройля  $\lambda$ , соответствующей ср. скорости частиц. Поскольку  $d = n^{-1/3}$  (где  $n$  — концентрация частиц), а  $\lambda = \hbar/\bar{p} \approx \hbar/\sqrt{mkT}$  (где  $\bar{p} \approx \sqrt{mkT}$  — ср. импульс,  $m$  — масса частиц,  $T$  — абс. темп-ра), условие  $\lambda \gtrsim d$  даёт простой критерий «включения» О. в. в идеальном газе:  $kT \leq \hbar^2 n^{2/3}/m$  (условие вырождения).

Характер О. в. различен для фермионов и для бозонов. Для фермионов О. в. является следствием Паули принципа, препятствующего сближению тождеств. частиц с одинаковым направлением спинов, и эффективно проявляется как отталкивание их друг от друга на расстояниях  $d \leq \lambda$ ; отличие от нуля энергии вырожденного газа фермионов (ферми-газа) целиком обусловлено таким О. в. Для сильно сжатого вещества, когда

$d$  значительно меньше размеров атомов (но больше ядерных), О. в. электронов (отталкивание) обуславливает осн. вклад в давление при «низких» темп-рах, удовлетворяющих условию вырождения. Такие условия осуществляются в звёздах типа белых карликов.

В системе тождеств. бозонов О. в., напротив, имеет характер взаимного притяжения частиц. Рассмотрение систем из большего числа одинаковых частиц производится на основе Ферми — Дирака статистики для фермионов и Бозе — Эйнштейна статистики для бозонов.

Если взаимодействующие тождеств. частицы находятся во внеш. поле, напр. в кулоновском поле ядра, то существование определённой симметрии волновой ф-ции и соответственно определённой корреляции движения частиц влияет на их энергию в этом поле, что также является обменным эффектом. Обычно (в атоме, молекуле, кристалле) это О. в. вносит вклад обратного знака по сравнению с вкладом О. в. частиц друг с другом. Поэтому суммарный обменный эффект может как понижать, так и повышать полную энергию взаимодействия в системе. Энергетич. выгода или невыгода состояния с параллельными спинами фермионов, в частности электронов, зависит от относит. величин этих вкладов. Так, в ферромагнетике (аналогично рассмотренному атому гелия) более низкой энергией обладает состояние, в к-ром спины (и магн. моменты) электронов в незаполненных оболочках соседних атомов параллельны; в этом случае благодаря О. в. возникает спонтанная намагниченность (см. Ферромагнетизм). Напротив, в молекулах с ковалентной хим. связью, напр. в молекуле  $H_2$ , энергетически выгодно состояние, в к-ром спины валентных электронов соединяющихся атомов антипараллельны.

О. в. объясняет, т. о., закономерности атомной и молекулярной спектроскопии, хим. связь в молекулах, ферромагнетизм (и антиферромагнетизм), а также др. специфич. явления в системах одинаковых частиц.

Лит. см. при ст. Квантовая механика.

**ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** в магнетизме — специфически квантовомеханич. связь между носителями магнетизма в атомных ядрах, атомах, молекулах, газах и конденсир. средах (обменное взаимодействие, косвенное обменное взаимодействие, РККИ-обменное взаимодействие). Первопричиной О. в. является принцип неразличимости тождеств. частиц (тождественности принцип). О. в. по своему генезису имеет электростатич. происхождение. Как правило, энергия электр. взаимодействия микрочастиц больше (по порядку величин) энергии магн. взаимодействия. Это следует из сравнения квазиклассич. выражений для электр. энергии взаимодействия двух элементарных зарядов  $e \sim 10^{-10}$  СГСЭ (расположенных на атомном расстоянии  $a \sim 10^{-8}$  см), равной  $e^2/a \sim 10^{-12}$  эрг, и энергии взаимодействия двух элементарных магн. моментов (магнетонов Бора  $\mu_B \sim 10^{-20}$  СГСМ), равной  $\mu_B^2/a^3 \sim 10^{-16}$  эрг. В классич. физике все магн. свойства микро- и макросистем определяются только магн. взаимодействиями микрочастиц. В то же время точки Кюри  $T_C$  магн. ферромагнетиков (т. е. темп-ра, выше к-рой ферромагнетизм исчезает) порядка  $10^2 \div 10^3$  К и, следовательно, соответствующие этим темп-рам энергии  $kT_C \sim 10^{-14} \div 10^{-13}$  эрг, что в десятки или сотни раз больше любой возможной энергии чисто магн. связи. Кроме того, опыты Я. Г. Дорфмана (1927) по определению отклонения  $\beta$ -частиц в спонтанно намагниченном ферромагнетике показали однозначно, что внутри ферромагнетика нет никакого эфф. поля магн. происхождения. Эти факты позволили предположить, что такое яркое магн. явление, как ферромагнетизм, по своему происхождению в основном не является магн. эффектом, а обусловлено электр. силами связи атомных носителей магнетизма в твёрдом теле. Связь магн. состояния простейших двухэлектронных микросистем с электр. взаимодействием электронов была показана на примере атома гелия В. Гейзенбергом (W. Heisen-