

условие возникновения ферромагн. состояния в модели коллективизиров. носителей магн. момента (см. *Зонный магнетизм*). В парамагн. состоянии число n_+ электронов (на один атом) со спином, направленным вдоль направления намагниченности, совпадает с числом n_- электронов со спином, направленным против намагниченности:

$$n_+ = n_- = n/2$$

(n — общее число электронов, приходящихся на один атом). В рамках *Сtoneра модели* при темп-ре $T = 0$ энергетич. подзоны электронов с противоположно направленными спинами в результате обменного взаимодействия раздвигаются на величину 2Δ , пропорциональную намагниченности, что приводит к увеличению числа электронов в подзоне с направлением спина против намагниченности (см. рис. (б, в.) в ст. *Stoneра модель*; при $T = 0$ хим. потенциал $\mu = \mathcal{E}_F$, где \mathcal{E}_F — ферми-энергия]. При этом произойдет изменение кинетич. энергии (в расчёте на один атом) на величину

$$\delta \mathcal{E}_K = \Delta(n_+ - n_-)/2 = \Delta mn/2,$$

где m — относит. намагниченность, $m = (n_+ - n_-)/n$. Предполагается, что величина Δ мала и можно ограничиться линейными по Δ членами. Изменение магн. энергии (в расчёте на один атом) при переходе из парамагн. состояния в ферромагнитное равно:

$$\delta \mathcal{E}_M = Un_+n_- - (1/4)Un^2 = (1/4)Un^2m^2,$$

где U — параметр обменного взаимодействия. В первом порядке по параметру Δ выполняется равенство

$$\rho(\mathcal{E}_F)\Delta = (n_+ - n_-)/2 = mn/2.$$

Здесь $\rho(\mathcal{E}_F)$ — значение плотности электронных состояний при энергии $\mathcal{E} = \mathcal{E}_F$. Полное изменение энергии равно:

$$\delta \mathcal{E} = \frac{n^2 m^2}{4\rho(\mathcal{E}_F)} [1 - U\rho(\mathcal{E}_F)].$$

Если выполняется неравенство $U\rho(\mathcal{E}_F) < 1$, то состоянию с наим. энергией будет соответствовать $m = 0$ и система окажется в парамагн. состоянии. В противном случае,

$$U\rho(\mathcal{E}_F) > 1, \quad (1)$$

минимуму энергии будет соответствовать ферромагн. состояние $m \neq 0$. Это условие наз. С. к. ф.

При наличии внеш. магн. поля полное изменение энергии, учитывающее зеемановское слагаемое, имеет вид:

$$\delta \mathcal{E} = \frac{n^2 m^2}{4\rho(\mathcal{E}_F)} [1 - U\rho(\mathcal{E}_F)] - m\mu_B H.$$

Равновесное состояние системы соответствует условию $d(\delta \mathcal{E})/dm = 0$, так что магн. восприимчивость (в расчёте на атом) имеет вид:

$$\chi = m\mu_B/H = \chi_0(1 - \alpha\chi_0), \quad (2)$$

где $\chi_0 = 2\mu_B\rho(\mathcal{E}_F)$, $\alpha = U/2\mu_B^2$. Ф-ла (2) описывает т. н. обменное усиление спиновой магн. восприимчивости при $T \rightarrow 0$ (χ_0 — значение магн. восприимчивости для системы не взаимодействующих электронов, χ — при учёте обменного взаимодействия в *среднего поля приближении* или в рамках теории *ферми-жидкости*; подробнее см. *Паули парамагнетизм*). С помощью (2) С. к. ф. (1) может быть записан в виде $\alpha\chi_0 \geq 1$, выражающем условие неустойчивости парамагн. состояния ($\chi \leq 0$) и допускающем разл. обобщения (напр., в коэф. α могут быть учтены не только обменные, но также корреляционные и спин-флуктуационные эффекты).

Пункты	Тип атомного столкновения	Схема процесса
10.	Ионизация атома или молекулы электронным ударом	$e + A \rightarrow 2e + A^+$
11.	Диссоциация молекулы электронным ударом	$e + AB \rightarrow e + A + B$
12.	Рекомбинация при тройных соударениях	$e + A^+ + B(e) \rightarrow A + B(e)$
13.	Диссоциативная рекомбинация	$e + AB^+ \rightarrow A + B$
14.	Диссоциативное прилипание электрона к молекуле	$e + AB \rightarrow A^- + B$
15.	Прилипание электрона к молекуле при тройных соударениях	$e + A + B \rightarrow A^- + B$
16.	Ассоциативная ионизация	$A + B \rightarrow AB^+ + e$
17.	Эффект Пеннинга (атом A^* находится в метастабильном состоянии, причём энергия его возбуждения превышает энергию ионизации атома B)	$A^* + B \rightarrow A + B^+ + e$
18.	Взаимная нейтрализация ионов	$A^+ + B^- \rightarrow A + B$
19.	Перезарядка ионов	$A + B^+ \rightarrow A^+ + B$
20.	Ион-молекулярные реакции	$A^+ + BC \rightarrow AB^+ + C$ $A^+ + BC \rightarrow AB + C^+$
21.	Разрушение отрицательного иона	$A^- + B \rightarrow A + B + e$
22.	Превращение атомных ионов в молекулярные	$A^- + B + C \rightarrow AB^- + C$
23.	Фотовозбуждение атома или молекулы (с последующим спонтанным излучением возбуждённого атома)	$h\nu + B \rightarrow B^*$
24.	Фоторекомбинация и фотоионизация	$e + A^+ \rightleftharpoons A + h\nu$
25.	Фотодиссоциация и фоторекомбинация атомов и радикалов	$h\nu + AB \rightleftharpoons A + B$
26.	Радиационное прилипание электрона к атому	$e + A \rightarrow A^- + h\nu$

Примечание: A, B и C обозначают атом или молекулу; B^* — электронно-возбуждённый атом или молекулу, e^- — электрон; A^+, B^+ — положительно заряженный ион, A^-, B^- — отрицательно заряженный ион; $h\nu$ — фотон. Стрелки указывают направление процесса.

В лаб. условиях и разл. явлениях природы гл. роль играют те или иные отдельные неупругие процессы соударения частиц. Напр., излучение с поверхности Солнца обусловлено б. ч. столкновениями между электронами и атомами водорода, при к-рых образуются отрицат. ионы водорода (табл., п. 26). Осн. процесс, обеспечивающий работу гелий-неонового лазера (см. *Газовый лазер*), — передача возбуждения атомами гелия, находящимися в метастабильных состояниях, атомам неона (табл., п. 6); осн. процесс в электрозарядных молекулярных газовых лазерах — возбуждение колебат. уровней молекул электронным ударом (табл., п. 3), в результате этого процесса электрич. энергия газового разряда частично преобразуется в энергию лазерного излучения. Осн. процессы в газоразрядных источниках света — возбуждение атомов электронными ударами (табл., п. 2) в резонансных лампах, а в лампах высокого давления — фоторекомбинация электронов и ионов (табл., п. 24). Спинной обмен (табл., п. 7) ограничивает параметры квантовых стандартов частоты, работающих на переходах между состояниями сверхтонкой структуры атома водорода или атомов щелочных металлов (табл., п. 9). Разл. неупругие процессы С. а. с участием свободных радикалов, ионов, электронов и возбуждённых атомов определяют многие свойства атмосферы Земли, причём на разных высотах преобладают разл. процессы.

Лит.: Мак-Данкель И., Процессы столкновений в ионизованных газах, пер. с англ., М., 1967; Смирнов В. М., Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме, М., 1968; его же, Ионы и возбуждённые атомы в плазме, М., 1974; Никитин Е. Е., Уманский С. Я., Неадиабатические переходы при медленных атомных столкновениях, М., 1979; Никитин Е. Е., Смирнов В. М., Медленные атомные столкновения, М., 1990. В. М. Смирнов.

СТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ — ионизация нейтральной частицы при соударениях с электронами, ионами, атомами. Подробнее см. *Ионизация*.