

магнитный момент атома обусловлен только спином электрона.

Пусть $B=0$. Для $T > \theta$ уравнение (10.42) имеет решение $\langle M \rangle = 0$. Таким образом, при $T > \theta$ ферромагнетик ведет себя как обычный парамагнетик. При $T < \theta$ появляется еще одно решение $\langle M \rangle \neq 0$. Этот второй корень уравнения (10.42) можно найти графически (рис. 10.7). Результирующий магнитный момент единичного объема, т. е. намагниченность, стремится при $T \rightarrow 0$ К к значению

$$J_s = \frac{N g \mu_B}{2}. \quad (10.43)$$

Это означает, что все спины ориентированы параллельно, т. е. имеет место ферромагнитное упорядочение (в отсутствие внешнего магнитного поля). С повышением температуры самопроизвольная намагниченность уменьшается, а затем исчезает при температуре Кюри. Такое поведение хорошо согласуется с опытом. Введение Вейссом внутреннего молекулярного поля позволило объяснить многие свойства ферромагнетиков. Однако природа самого поля долгое время оставалась неизвестной. Предположение о том, что силы, ориентирующие спиновые магнитные моменты в ферромагнетике, имеют чисто магнитное происхождение, было экспериментально опровергнуто в 1927 г. Я. Г. Дорфманом.

10.6. ОПЫТ ДОРФМАНА

Если поле Вейсса действительно имеет магнитную природу, то оно должно быть очень большим. Энергия взаимодействия этого поля с магнитным моментом атома примерно равна средней тепловой энергии, приходящейся на один атом в точке Кюри (поскольку при $T = \theta$ магнитный порядок разрушается). Для многих ферромагнетиков температура Кюри составляет несколько сотен или даже превышает тысячи кельвин. Таким образом,

$$E_{вз} \approx k_B \theta \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 10^3 \text{ К} = 1,38 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}.$$

Поскольку $E_{вз} \approx \mu_B V_i$,

$$V_i = \frac{1,38 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}}{0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}} \approx 10^3 \text{ Тл}.$$

Я. Г. Дорфман предпринял попытку измерить V_i . Схема опыта Дорфмана представлена в двух проекциях на рис. 10.8. От источника 1 узкий пучок электронов пропускали через тон-

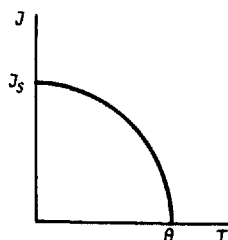


Рис. 10.7. Зависимость самопроизвольной намагниченности ферромагнетика от температуры

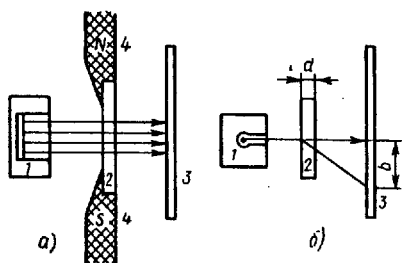


Рис. 10.8. Схема опыта Дорфмана:
 1 — источник электронов, 2 — тонкая фольга никеля, 3 — фотопластинка, 4 — полюса электромагнита

параллельно внешнему полю \vec{B} , т. е. перпендикулярно скорости электронов в пучке (рис. 10.8, а). Если это внутреннее поле \vec{B}_i имеет магнитную природу, то пучок электронов при прохождении через фольгу должен отклоняться под действием суммарного поля $\vec{B} + \vec{B}_i$. Это должно привести к смещению следа электронов на фотоснимке. При выбранных Дорфманом условиях опыта ожидалось получить смещение $b \approx 10$ мм (рис. 18.8, б). Однако оказалось, что отклонение пучка электронов значительно меньше ($b \approx 0,3$ мм). Это отклонение соответствовало воздействию поля $B \approx 1$ Тл, т. е. значению магнитной индукции в образце. Отсюда был сделан вывод о немагнитной природе молекулярного поля Вейсса. Выполненные впоследствии опыты по отклонению электронов и мезонов в образцах железа и железо-кобальтового сплава полностью подтвердили результат, полученный Дорфманом.

Таким образом, оставалось предположить, что поле \vec{B} имеет электрическую природу. Однако в рамках классической теории объяснить такое, казалось бы, чисто магнитное явление, как ферромагнетизм, какими-либо электрическими взаимодействиями не удалось. Только квантовая механика смогла решить эту задачу.

10.7. ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЕГО РОЛЬ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА

Гиромангнитные опыты Эйнштейна-де Гааза и Барнетта показали, что в ферромагнетиках самопроизвольная намагниченность обусловлена спиновым магнетизмом электронов, а из опыта Дорфмана следовало, что взаимодействие между электронами соседних атомов с недостроенными оболочками, при-

кую ($d \approx 20$ мкм) фольгу никеля 2, помещенную между полюсами электромагнита 4. На фотопластинке 3 регистрировали след пучка. При постановке опыта предполагалось, что если фольга намагничена до насыщения параллельно ее поверхности, то молекулярное поле \vec{B}_i ориентировано во всем образце