

или поглощением теплоты. Поэтому он является примером фазового перехода второго рода (см. т. I, § 15.5).

8. При намагничивании ферромагнетика происходит изменение его формы и объема. Это явление называется **магнитострикцией**. Явление магнитострикции было открыто Д. Джоулем в 1842 г. Впервые правильное объяснение магнитострикции дал Н. С. Акулов в 1928 г.

Величина и знак магнитострикции зависят от напряженности  $H$  намагничивающего поля и природы ферромагнетика. Так, в никеле линейная магнитострикция  $\Delta l/l_0$  при любых магнитных полях отрицательна, в пермаллое — положительна; в железе при слабых полях положительна, а при сильных полях — отрицательна. У ферромагнетиков наблюдается также и обратное явление — изменение намагниченности при деформации. Сплавы со значительной магнитострикцией применяются в приборах, служащих для измерения давлений и деформаций. Механические колебания, возникающие в ферромагнетиках при их намагничивании в периодически изменяющемся магнитном поле, используются в ультразвуковых магнитострикционных вибраторах. Теоретическое объяснение явления магнитострикции выходит за рамки нашего курса.

## § 20.7. Понятие о природе ферромагнетизма

1. В классической теории ферромагнетизма не вскрывалась природа внутреннего («молекулярного») поля. В соответствии с двумя гипотезами, положенными в основу классической теории ферромагнитных явлений, объяснение ферромагнетизма разбивается на две части:

а) истолкование природы самопроизвольной намагниченности, т. е. выяснение физического смысла ферромагнетизма;

б) объяснение действия внешнего магнитного поля на области спонтанной намагниченности, т. е. создание теории кривой намагничивания  $J = f(H)$ .

В этом параграфе мы коротко остановимся на современных представлениях о природе ферромагнетизма.

2. Опыты Эйнштейна и де-Гааза и явление Барнетта позволяют определить числовые значения гиромангнитного отношения  $g$  для различных веществ. Для ферромагнитных веществ  $g$  оказалось таким, какое имеет место для спиновых моментов  $p_{ms}$  и  $L_{es}$  [см. формулу (20.21)]. Результаты этих опытов являются экспериментальным доказательством того, что в создании самопроизвольной намагниченности ферромагнетиков орбитальные магнитные моменты практически не принимают участия. Из опытов по измерению  $g$  для ферромагнитных тел следует, что элементарными носителями магнетизма в таких телах являются **спин о в ы е м а г н и т н ы е м о м е н т ы э л е к т р о н о в**.

3. Согласно классическим представлениям, электроны в атоме движутся вокруг ядра по некоторым орбитам, причем совокупность определенного числа электронных орбит образует **электронную оболочку**. В каждом атоме имеется некоторое число оболочек, каждая из которых содержит определенное число электронов. Все оболочки, кроме

ближайшей к ядру, в свою очередь подразделяются на **слои**, или **подоболочки**. Электроны в атоме стремятся занять места в оболочках и подоболочках, ближе расположенных к ядру, так как энергия электрона при этом уменьшается и его состояние делается более устойчивым. Вопрос о том, как в соответствии с принципом Паули происходит заполнение электронами оболочек и подоболочек, подробно рассмотрен в третьем томе курса. Сейчас обратим внимание лишь на одну особенность ферромагнитных металлов. Атомы элементов, обладающих ферромагнитными свойствами (Fe, Co, Ni), принадлежат к числу переходных атомов периодической системы Д. И. Менделеева. В этих атомах нарушается последовательность заполнения электронами мест в оболочках и слоях. Прежде чем полностью «застроится» нижняя оболочка, начинается заполнение выше расположенной оболочки. Поэтому в переходном атоме появляются не заполненные электронами внутренние слои и оболочки. Например, в атоме железа 26 его электронов распределены на четырех оболочках. Первая и вторая оболочки целиком заполнены и содержат соответственно 2 и 8 электронов. Третья и четвертая оболочки не достроены: на третьей оболочке находится 14 электронов (вместо 18), а на четвертой — 2 (вместо 32). 14 электронов третьей оболочки распределены по слоям следующим образом: в первом слое — 2, а во втором и третьем — по 6 электронов. Спины электронов, расположенных в каждом слое, могут быть ориентированы в двух противоположных направлениях. В застроенных первых двух оболочках атома железа магнитные спиновые моменты электронов взаимно компенсируют друг друга. В третьей оболочке первые два слоя также характерны тем, что спиновые магнитные моменты электронов, расположенных в этих слоях, компенсируют друг друга. Что же касается третьего слоя, то из шести находящихся в нем электронов пять имеют спины, ориентированные в одном направлении<sup>1</sup>, и лишь один электрон имеет спин, ориентированный противоположно. Итак, в атоме железа четыре электронных спина в третьей оболочке остаются некомпенсированными. Что касается наружных валентных электронов атома железа, то их спины, вообще говоря, тоже могут быть некомпенсированы. Однако, как показывает опыт, на магнитные свойства атома железа валентные электроны, слабо связанные с атомом, существенного влияния не оказывают.

В изолированном атоме железа орбитальные движения электронов дают некоторый орбитальный магнитный момент. Однако при образовании кристалла железа происходит своеобразное «замораживание» электронных орбит, приводящее к тому, что орбитальные магнитные моменты электронов практически не участвуют в создании магнитных моментов атомов. Причины такого «замораживания» еще не вполне выяснены. Вместе с тем измерения гиромагнитного отношения  $g$  ясно показывают, что магнитные свойства ферромагнитных веществ связаны с некомпенсированными спиновыми магнитными моментами небольшого числа электронов атома. Таким образом, ферромагнитными свой-

---

<sup>1</sup> Это не противоречит принципу Паули, так как энергетические состояния этих электронов оказываются различными.

ствами могут обладать только такие вещества, в атомах которых имеются недостроенные внутренние электронные оболочки. Однако это условие является необходимым, но не достаточным. Например, ряд атомов элементов переходной группы (Cr, Mn, Pt и др.) и атомы редкоземельных элементов имеют недостроенные внутренние оболочки, но эти вещества являются парамагнетиками.

4. Для объяснения самопроизвольной намагниченности ферромагнетиков необходимо предположить, что в них между носителями магнетизма — спинами электронов — существует сильное взаимодействие, способное при температурах, более низких, чем точка Кюри, создать внутреннее («молекулярное») поле. Естественно предположить, что между спиновыми магнитными моментами существует обыкновенное магнитное взаимодействие, подобное взаимодействию двух проводников с токами (см. § 15.2) или двух соленоидов (см. § 17.3). Однако расчеты показывают, что при этом энергия магнитного взаимодействия спинов оказывается весьма малой величиной порядка  $10^{-23}$  Дж. Даже при температуре жидкого воздуха средняя энергия теплового движения атомов превосходит эту энергию магнитного взаимодействия атомов. Поэтому за счет магнитного взаимодействия невозможно образование самопроизвольной намагниченности. В 1927 г. Я. Г. Дорфман экспериментально доказал, что «молекулярное» поле имеет не магнитное происхождение. Он наблюдал за отклонениями пучков электронов, прошедших сквозь намагниченную никелевую фольгу. Если бы в никеле существовали внутренние «молекулярные» магнитные поля, достаточные для возникновения ферромагнетизма, то пучок электронов должен был бы сильно отклоняться. Опыт показал, что электронный пучок отклонялся незначительно. Этим была доказана немагнитная природа взаимодействия между спинами электронов, являющегося причиной ферромагнетизма.

В § 20.4, рассматривая спиновый парамагнетизм металлов, мы видели, что энергия системы электронов зависит от ориентации спинов электронов. Если электроны между собой не взаимодействуют, то энергия системы электронов в отсутствие внешнего поля минимальна, а состояние системы наиболее устойчиво в том случае, когда спиновые магнитные моменты электронов ориентируются попарно противоположно друг другу. Если между электронами существует электрон-электронное взаимодействие, то, как показали Я. И. Френкель и В. Гейзенберг, состояние системы электронов в теле может быть более устойчивым и энергетически выгодным, когда спиновые магнитные моменты электронов ориентированы параллельно друг другу. В последнем случае может наблюдаться самопроизвольная намагниченность тела. Возникновение самопроизвольной намагниченности за счет электрических сил нельзя объяснить с точки зрения классической физики. Само существование спина у электрона является «неклассическим», т. е. чуждым классической физике явлением. Не удивительно поэтому, что и электрическое взаимодействие электронов, приводящее к состоянию самопроизвольной намагниченности ферромагнетиков, также является особым квантовым взаимодействием, называемым обменным взаимодействием.