

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ СРЕД

В основе макроскопической электродинамики Максвелла, как мы убедились в предыдущих главах, лежит описание электромагнитных процессов в средах, свойства которых задаются феноменологически с помощью соотношений

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{E}, \mathbf{B}), \quad \mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{E}, \mathbf{B}), \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}(\mathbf{E}, \mathbf{B}),$$

рассматриваемых как результат обобщения данных макроскопических опытов. Однако в конце XIX в., когда с открытием электрона стало ясно, что в состав атомов входят заряженные частицы, заряд которых кратен заряду электрона, возникла задача «объяснения» макроскопических параметров типа ϵ , μ , σ на основе моделирования атомной структуры. С исчерпывающей полнотой эта задача была поставлена и в основном решена замечательным голландским физиком Г. А. Лоренцем (1853—1928).

§ 56. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ЛОРЕНЦА

В главном своем труде «Теория электронов», говоря о недостаточности описания вещества с помощью коэффициентов ϵ , μ , σ , Лоренц писал: «Если мы хотим понять, каким образом электрические и магнитные свойства зависят от температуры, плотности, химического строения или кристаллического состояния вещества, то мы не можем удовлетвориться простым введением для каждого вещества этих коэффициентов, значения которых должны определяться из опыта; мы будем принуждены обратиться к какой-нибудь гипотезе относительно механизма, лежащего в основе всех этих явлений»*.

С точки зрения Лоренца, фундаментальная роль в этом механизме должна отводиться «электронам», под которыми он понимал все заряженные частицы, входящие в состав атомов, т. е. отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные ядра атомов. Для построения «электронной теории» в соответствии с намеченной программой Лоренц сформулировал в 1888 г. следующие исходные гипотезы:

* Лоренц Г. А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. Л.— М., 1934. С. 21—22.

1. Все вещество состоит из положительно и отрицательно заряженных электронов. Никаких других материальных объектов, кроме электронов, не существует.

2. Электроны находятся в электромагнитном эфире, состояние которого описывается электромагнитным полем, подчиняющимся уравнениям Максвелла в вакууме.

3. Электрон можно представить себе в виде заряда, распределенного с некоторой плотностью ρ в очень малом объеме.

4. Движение электронов определяется действующей на них электромагнитной силой плотностью $\mathbf{f} = \rho(\mathbf{E} + c^{-1}[\mathbf{v}\mathbf{B}])$.

5. Макроскопические поля суть средние по времени и пространству от микроскопических полей.

6. Эфир неподвижен в определенной инерциальной системе отсчета.

Не все из этих постулатов могут быть оправданы с современной точки зрения. Прежде всего следует отметить, что для описания структуры атомов уже нельзя использовать законы классической механики, их место должны занять новые закономерности — квантовые. В частности, помимо заряда необходимо учитывать и такие характеристики микрочастиц, как спин, магнитный момент и т. д. В основном квантовые эффекты проявляются при описании взаимодействия микрочастиц: наряду с известными электромагнитными силами существуют еще обменные силы, спин-орбитальные, спин-спиновые и др. Наконец, совершенно излишней является гипотеза Лоренца о неподвижном электромагнитном эфире, анализ которой дан в части курса, посвященной теории относительности.

Будучи ограниченными классическим описанием материи, мы не в силах исправить все недостатки схемы Лоренца, но для получения основных следствий электронной теории вполне достаточно следующих исходных постулатов:

1. Вещество имеет атомистическую структуру. Его электромагнитные свойства обусловлены легкими отрицательно заряженными электронами с зарядом $e = -4,803242 \text{ СГС}_q$ и тяжелыми положительно заряженными ядрами с зарядами, кратными заряду электрона.

2. Эти элементарные заряды являются источниками микроскопического электромагнитного поля, которое вне зарядов подчиняется уравнениям Максвелла — Лоренца, т. е. уравнениям Максвелла в пустоте.

3. Модели атомов, молекул и самих электронов нельзя построить без допущения сил неэлектромагнитного происхождения, структура которых должна разумно постулироваться.

4. Макроскопические поля \mathbf{E} и \mathbf{B} суть средние по пространству и времени от соответствующих микроскопических полей \mathbf{e} и \mathbf{b} .

5. Наконец, забегаая несколько вперед, следует потребовать, чтобы уравнения Максвелла — Лоренца для полей \mathbf{e} и \mathbf{b} и урав-

нения движения зарядов были ковариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. В связи с этим введение неподвижного электромагнитного эфира оказывается излишним.

§ 57. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА—ЛОРЕНЦА И МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Согласно вышеизложенным постулатам, уравнения Максвелла—Лоренца для микрополей \mathbf{e} и \mathbf{b} имеют вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{b} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}^{\text{микр}}, \quad \operatorname{div} \mathbf{e} = 4\pi \rho^{\text{микр}}, \quad (57.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{b} = 0.$$

При этом микроскопические плотности заряда и тока могут быть представлены в форме

$$\rho^{\text{микр}}(t, \mathbf{r}) = \sum_i \rho_i(t, \mathbf{r}); \quad \mathbf{j}^{\text{микр}}(t, \mathbf{r}) = \sum_i \mathbf{j}_i(t, \mathbf{r}),$$

где ρ_i , \mathbf{j}_i —плотности заряда и тока для отдельной заряженной частицы номера i . Если частицы считать точечными, то

$$\rho_i = \rho_i^{\text{точ}}(t, \mathbf{r}) = e_i \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)],$$

$$\mathbf{j}_i = \mathbf{j}_i^{\text{точ}}(t, \mathbf{r}) = e_i \mathbf{v}_i \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)],$$

где $\mathbf{r}_i(t)$ —радиус-вектор положения частицы, $\mathbf{v}_i(t)$ —ее скорость, e_i —заряд. Но в таком случае не учитывается, например, тот важный факт, что заряженные частицы могут обладать собственными магнитными и электрическими дипольными моментами. Используя представления (2.12) и (2.13) для плотностей связанных зарядов и токов, учтем подобные структурные эффекты, добавив к $\rho_i^{\text{точ}}$ и $\mathbf{j}_i^{\text{точ}}$ следующие источники:

$$\rho'_i = -\operatorname{div} \boldsymbol{\pi}_i, \quad \mathbf{j}'_i = \partial \boldsymbol{\pi}_i / \partial t + c \operatorname{rot} \boldsymbol{\mu}_i,$$

где $\boldsymbol{\pi}_i$ и $\boldsymbol{\mu}_i$ —вспомогательные векторы, исчезающие вне частицы номера i и в практических расчетах принимаемые δ -образными. Таким образом,

$$\rho^{\text{микр}}(t, \mathbf{r}) = \sum_i \{ e_i \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)] - \operatorname{div} \boldsymbol{\pi}_i \},$$

$$\mathbf{j}^{\text{микр}}(t, \mathbf{r}) = \sum_i \{ e_i \mathbf{v}_i \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)] + \partial \boldsymbol{\pi}_i / \partial t + c \operatorname{rot} \boldsymbol{\mu}_i \}. \quad (57.2)$$

Так как заряженные частицы движутся по сложным, запутанным траекториям, то порождаемые ими микрополя \mathbf{e} и \mathbf{b} имеют нерегулярную, случайную структуру. В то же время макроскопические поля \mathbf{E} и \mathbf{B} , подчиняющиеся уравнениям Максвелла (10.1), являются регулярными функциями, так как порождаются макроскопическими источниками $\rho^{\text{полн}}$ и $\mathbf{j}^{\text{полн}}$, получающимися усреднением соответствующих микроскопических источников