

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Глава 1. Электростатика в вакууме.

Литература:

- 1). Д.В. Сивухин, Общий курс физики. Том 3.
- 2). А.Н. Матвеев, «Электричество и магнетизм».
- 3). И.Е. Иродов, «Основные законы электромагнетизма»
- 4). И.В. Савельев, Курс общей физики. Том 2.

1.1. Введение. Основные положения теории электромагнетизма.

1.1.1. Основные положения теории электромагнетизма.

Приведем основные *экспериментальные факты*, лежащие в основе представлений об электричестве и магнетизме.

- 1). Экспериментальный факт: *дуализм* или *двойственность* заряда. Если В притягивает С и если В притягивает А, то А отталкивает С. «Положительные» и «отрицательные» заряды – это 2 проявления определенной симметрии. В частности, проявление инвариантности относительно преобразования времени $t \rightarrow -t$.
- 2). Экспериментальный факт: закон *сохранения заряда* – полный заряд изолированной системы никогда не меняется. Наблюдаемый минимальный по величине заряд – это заряд электрона, который равен по модулю заряду протона и заряду позитрона. Итак, опыт установил следующее:
 - 1) измеренный суммарный заряд системы, состоящей из электрона и протона, т.е. атома водорода, имеет ограничение $(e^- + p^+) < 10^{-20} e^-$,
 - 2) из проверки нейтральности атома Cs получено, что возможный заряд атома составляет величину не больше, чем $10^{-16} e^-$ по модулю; установлено, что с этой точностью атом цезия нейтрален
 Итак, нарушения закона сохранения заряда не наблюдается.
- 3). *Релятивистская инвариантность* полного заряда: алгебраическая сумма зарядов в изолированной системе не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета (ИСО) к другой независимо от скорости их относительного движения.
- 4). *Квантование* или *дискретность* заряда. Минимально наблюдаемый заряд – заряд электрона, остальные все заряды кратны ему. Впервые это было получено в опытах Роберта Милликена.

Кратко рассмотрим опыты Р. Милликена (1911 г.). В воздушный конденсатор помещались капельки масла с помощью распылителя (рис. 1.1). Капли могли быть заряжены в процессе распыления или при поглощении излучения ультрафиолетовой лампы за счет фотоэффекта. Без включения электрического поля имеем равенство сил – с одной стороны силы тяжести и силы Архимеда, а с другой стороны силы сопротивления воздуха при установившейся скорости падения капли масла – силы Стокса:

$$mg - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_g g = 6\pi\eta r v_g \quad (1.1.1)$$

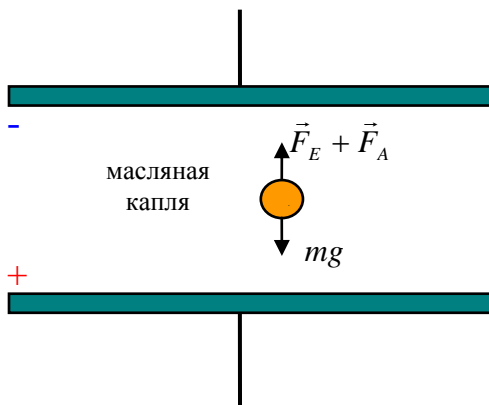


Рис. 1.1.

Здесь масса капли $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_k$, r – ее радиус, ρ_k и ρ_g – плотности масляной капли и воздуха; η – коэффициент вязкости воздуха, v_g – установившаяся скорость. Подставляя массу капли в (1.1.1), находим квадрат радиуса капли:

$$r^2 = \frac{9\eta v_g}{2(\rho_k - \rho_g)g} \quad (1.1.2)$$

Наблюдая конденсатор под микроскопом и измеряя скорость падения капли, узнаем ее радиус.

Далее, включаем напряжение на конденсаторе, при этом так подбираем напряжение, чтобы скорость капли равнялась нулю $v_g = 0$. Тогда получаем следующее равенство сил:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_k - \rho_g)g = qE \quad (1.1.3)$$

где q – заряд капли, E – напряженность электрического поля (подробнее о напряженности поля см в следующем параграфе 1.2). Из соотношения (1.1.3) можно найти заряд капли. При освещении конденсатора ультрафиолетовым светом заряд капли изменяется (явление фотоэффекта). Тогда снова подбираем напряжение, чтобы скорость капли равнялась нулю, и определяем ее новый заряд. Оказалось, что заряд капли всегда кратен одной и той же величине – заряду электрона e^- :

$$\Delta q = ne \quad (1.1.4)$$

где $e^- = 4.803 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}_q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Дальнейшие исследования показали, что существуют элементарные частицы – *кварки*, их заряды – дробные числа от заряда электрона $\left(\pm \frac{1}{3}e, \pm \frac{2}{3}e\right)$, но кварки не появляются в свободном состоянии. В свободном состоянии заряды всех элементарных частиц кратны заряду электрона.

Примечание 1. *Роберт Эндрюс Милликен, американский физик, 1868-1953*, Нобелевская премия 1923 г. за работы в области элементарных зарядов и фотоэлектрического эффекта;
Джордж Габриэль Стокс, английский физик и математик, 1819–1903.

1.1.2. Уравнения Максвелла.

Классическая теория электромагнитных явлений основана на *уравнениях Максвелла*, являющихся обобщением опытных фактов. Эти уравнения образуют систему уравнений, которая связывает воедино основные электромагнитные величины и описывает все наблюдаемые классические электромагнитные явления. Здесь мы приведем эти уравнения, не объясняя пока весь их смысл, с целью постепенного их получения исходя из экспериментальных фундаментальных законов.

Запишем эти уравнения в двух системах единиц, которые наиболее широко используются в теории: *СГС* (*CGS*) (или далее система единиц Гаусса) и *СИ* (*SI* или международная система единиц).

Уравнения Максвелла в интегральной форме:

$$\begin{array}{l} \text{CGS} \\ \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \frac{4\pi}{c} \int_S \vec{j} d\vec{S} + \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} d\vec{S} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{SI} \\ \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} d\vec{S} \end{array} \quad (1.1.5)$$

$$\begin{array}{l} \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} \\ \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} \\ \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \end{array} \quad (1.1.6)$$

$$\begin{array}{l} \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \\ \oint_S \vec{D} d\vec{S} = 4\pi q \end{array} \quad \begin{array}{l} \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \\ \oint_S \vec{D} d\vec{S} = q \end{array} \quad (1.1.7)$$

$$\begin{array}{l} \oint_S \vec{D} d\vec{S} = 4\pi q \\ \oint_S \vec{D} d\vec{S} = q \end{array} \quad (1.1.8)$$

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\begin{array}{l} \text{CGS} \\ \text{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \\ \text{div} \vec{D} = 4\pi \rho \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{SI} \\ \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \\ \text{div} \vec{D} = \rho \end{array} \quad (1.1.9)$$

$$\begin{array}{l} \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \end{array} \quad (1.1.10)$$

$$\begin{array}{l} \text{div} \vec{B} = 0 \\ \text{div} \vec{D} = \rho \end{array} \quad (1.1.11)$$

$$\begin{array}{l} \text{div} \vec{D} = \rho \end{array} \quad (1.1.12)$$

Здесь в уравнениях (1.1.5)–(1.1.12) введены следующие обозначения: q – электрический заряд; ρ – плотность электрического заряда; \vec{E} и \vec{D} – напряженность и индукция электрического поля, соответственно; \vec{j} – плотность электрического тока; \vec{B} и \vec{H} – индукция и напряженность магнитного поля, соответственно; c – скорость света; производные $\partial/\partial t$ берутся по времени. Интегралы в (1.1.5)–(1.1.6) от скалярного произведения вектора на элемент контура $d\vec{l}$ берутся по замкнутому контуру L и носят название *циркуляции* этого вектора. В правой части этих уравнений интегралы от скалярного произведения векторов на элемент поверхности $d\vec{S}$ берутся по поверхности S , опирающейся на контур L и называются *поток вектора* через эту поверхность. Интегралы в (1.1.7)–(1.1.8) от скалярного произведения вектора на элемент поверхности $d\vec{S}$ берутся по замкнутой поверхности S .

Соответствующие дифференциальные уравнения (1.1.9)–(1.1.12) записываются с помощью дифференциальных операторов *rot* и *div*, о которых подробнее расскажем ниже.

В дополнение к уравнениям Максвелла в дифференциальной форме (1.1.9)–(1.1.12) рассматриваются *материальные уравнения*. Эти уравнения имеют наиболее простой вид для однородной, изотропной и недиспергирующей среды:

$$\begin{array}{ll} CGS & SI \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} & \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \end{array} \quad (1.1.13)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (1.1.14)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad \vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1.1.15)$$

Здесь ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, σ – электрическая проводимость среды, ϵ_0 и μ_0 – размерные константы, вводимые в системе *СИ*.

Закон сохранения заряда является экспериментальным фактом (который в принципе также следует из уравнений Максвелла) и записывается в виде уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0 \quad (1.1.16)$$

Смысл всех величин и параметров, входящих в эти уравнения (1.1.5)–(1.1.15), более подробно будет обсуждаться в этом разделе. Можно рассматривать эти уравнения как постулат теории и далее вывести и объяснить все опытные электромагнитные явления (это *метод дедукции*). А можно получить эти уравнения, обобщая экспериментальные данные и факты (*метод индукции*), а затем воспользоваться ими для дальнейшего рассмотрения новых явлений электромагнетизма. Наша задача в этом разделе состоит в том, чтобы придти к этим уравнениям, отталкиваясь от экспериментальных фактов.

Диапазон применения уравнений Максвелла очень широк:

- 1) Уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца, поэтому они справедливы и в области релятивистских скоростей.
- 2) Квантовый характер электромагнитных сил не сказывается на расстояниях вплоть до 10^{-10} см (примерно в 100 раз меньше размера атома). Для меньших расстояний необходимо использовать уравнения квантовой электродинамики.

Примечание 2. Основные эксперименты и положения теории в электромагнетизме были проделаны и внесены следующими физиками (учеными, внесшими наибольший вклад в развитие представлений об электромагнитных явлениях):

Шарль О. Кулон (французский физик, 1736-1806),

Пьер С. Лаплас (французский астроном, физик и математик, 1749-1827),

Андре М. Ампер (французский физик и математик, 1775-1836),

Ханс К. Эрстед (датский физик, 1777-1851),

Жан Б. Био (французский физик, 1774 - 1862),

Симеон Д. Пуассон (французский механик, математик и физик, 1781-1840),

Карл Ф. Гаусс (немецкий математик, астроном и физик, 1777-1855),

Феликс Савар (французский физик, 1791 – 1841),

Михаил Васильевич Остроградский (русский математик и механик, 1801-1862),

Джордж Грин (британский математик и физик, 1793-1841),

Генрих Р. Герц (немецкий физик, 1857-1894)

и другие.

Однако и на их фоне выделяются гиганты в физике:

Майкл Фарадей (английский физик, 1791-1867) и

Джеймс К. Максвелл (английский физик, 1831-1879).

Электростатика – законы, определяющие поведение и взаимодействие неподвижных зарядов.