

## Лабораторная работа № 2-05

# ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Э.Н.Колесникова

### Цель работы

Изучение движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях и определение удельного заряда электрона  $e/m$  с помощью катушек Гельмгольца.

### Теоретическое введение

Удельный заряд электрона  $e/m$  относится к числу фундаментальных констант таких, как скорость света  $c$ , постоянная Планка  $h$ , постоянная Больцмана  $K$  и др. При движении электрона в электрических и магнитных полях траектория электрона определяется конфигурацией этих полей и отношением заряда электрона к его массе.

В однородном электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$  на частицу с зарядом  $q$  действует сила

$$\vec{F}_e = q\vec{E}, \quad (5.1)$$

в результате чего частица движется с постоянным ускорением  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , согласно второму закону Ньютона.

В однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на заряд, движущийся со скоростью  $\vec{V}$ , действует магнитная *сила Лоренца*, определяемая по формуле

$$\vec{F}_m = q[\vec{V} \vec{B}]. \quad (5.2)$$

Эта сила всегда перпендикулярна скорости  $\vec{V}$  заряженной частицы, поэтому она изменяет только направление этой скорости, не изменяя её модуля, следовательно, сила

Лоренца не совершает работы над частицей. Направление силы Лоренца  $\vec{F}_m$  определяется с помощью правила правого винта и зависит от знака заряда частицы.

На рис. 5.1 показана взаимная ориентация векторов  $\vec{V}, \vec{B}$  (поле направлено к нам) и  $\vec{F}_m$  для положительного заряда (рис. 5.1, а) и для отрицательного заряда (рис. 5.1, б). На отрицательный заряд сила действует в противоположном направлении.

Итак, действие силы Лоренца проявляется только в искривлении траектории частицы.

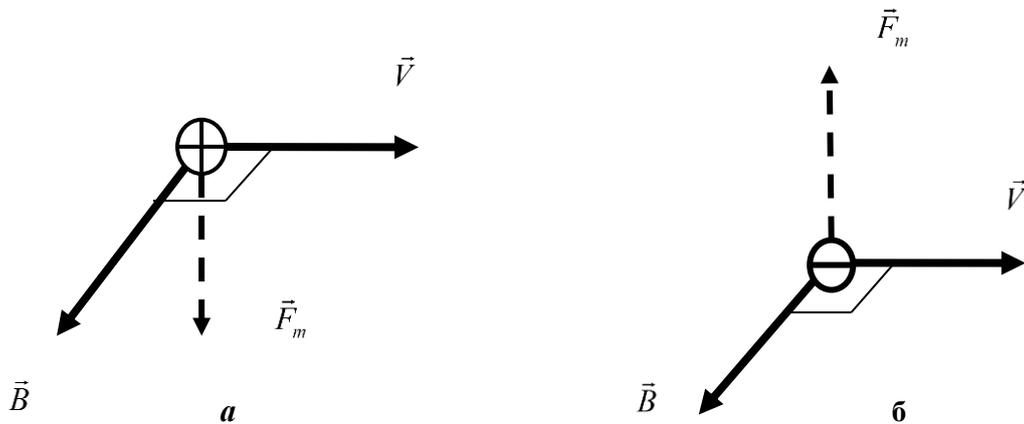


Рис. 5.1. Взаимная ориентация векторов  $\vec{V}, \vec{B}$  и  $\vec{F}_m$  для положительного (а) и отрицательного (б) зарядов.

Модуль силы Лоренца равен

$$|\vec{F}_m| = qVB \sin(\vec{V}\vec{B}). \quad (5.3)$$

Отметим, что магнитное поле не действует на покоящийся электрический заряд. В этом существенное отличие магнитного поля от электрического. Магнитное поле действует только на движущиеся заряды.

Если на движущийся электрический заряд помимо магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$  действует и электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$ , то результирующая электромагнитная сила Лоренца  $\vec{F}_{Эм}$ , приложенная к заряду, равна векторной сумме сил

– силы, действующей со стороны электрического поля, и силы, действующей со стороны магнитного поля:

$$\vec{F}_{эм} = q\vec{E} + q[\vec{V}\vec{B}]. \quad (5.4)$$

Это выражение называется *формулой Лоренца*. Скорость  $\vec{V}$  в этой формуле есть скорость заряда относительно магнитного поля.

Для вывода общих закономерностей будем считать, что магнитное поле *однородно*, а электрические поля на частицы не действуют.

При движении частицы со скоростью  $\vec{V}$  вдоль линий магнитной индукции  $\vec{B}$  магнитное поле не влияет на ее движение, так как модуль силы  $|\vec{F}|$  равен нулю (см. формулу (5.3)).

Если частица движется со скоростью  $\vec{V}$  перпендикулярно к магнитному полю  $\vec{B}$ , то сила Лоренца, равная  $\vec{F}_m = q[\vec{V}\vec{B}]$ , постоянна по модулю  $|\vec{F}_m| = qVB$  и нормальна к траектории частицы. Согласно второму закону Ньютона, эта сила создает ускорение:  $\vec{F} = m\vec{a}$ . Вектор полного ускорения  $\vec{a}$  равен векторной сумме нормального и тангенциального ускорений:  $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$ . Тангенциальное ускорение  $\vec{a}_\tau$ , характеризующее изменение модуля скорости от времени, равно нулю, т.е.  $a_\tau = \frac{dV}{dt} = 0$ , поскольку модуль скорости не изменяется во времени (о чем сказано выше). Следовательно, сила Лоренца создает центростремительное (нормальное) ускорение  $\frac{V^2}{r}$ . Отсюда следует, что частица будет двигаться по окружности, радиус которой определяется из условия

$$qVB = \frac{mV^2}{r}, \quad (5.5)$$

и, следовательно, равен

$$r = \frac{mV}{qB}. \quad (5.6)$$

Время  $T$  одного полного оборота частицы называется *периодом вращения частицы*

$$T = \frac{2\pi r}{V}.$$

Подставив в эту формулу выражение (5.6), получим

$$T = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{q},$$

т.е. период вращения частицы в однородном магнитном поле определяется только величиной, обратной удельному заряду  $q/m$  частицы, магнитной индукцией поля  $B$ , но не зависит от её скорости  $V$ , т.к. при  $V \ll c$   $m = m_0$ , где  $m_0$  – масса покоя.

Если скорость  $\vec{V}$  заряженной частицы направлена под углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ , то её движение можно представить в виде суперпозиции двух движений:

- 1) равномерного прямолинейного движения вдоль вектора  $\vec{B}$  со скоростью  $V_{\parallel} = V \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между направлениями вектора скорости  $\vec{V}$  и вектором  $\vec{B}$ ;
- 2) равномерного движения со скоростью  $V_{\perp} = V \sin \alpha$  по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ .

В результате сложения двух движений возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю (рис. 5.2)

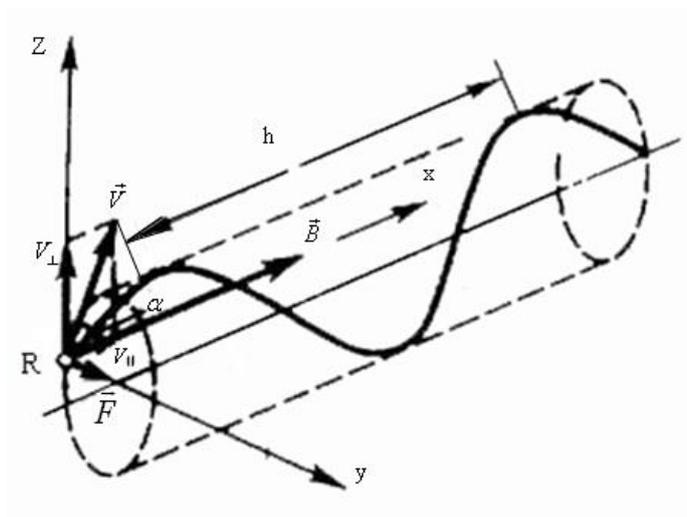


Рис. 5.2. Траектория движения заряженной частицы, влетевшей под углом к силовым линиям однородного магнитного поля

Расстояние  $h$  между двумя ближайшими витками винтовой линии называется шагом. Шаг винтовой линии равен:

$$h = V_{\parallel} T = VT \cos \alpha .$$

В данной лабораторной работе в качестве заряженной частицы рассматривается движение электрона  $e$ , и все соотношения, рассмотренные выше, справедливы для него.

Первоначально покоящийся электрон с зарядом  $e$  и массой  $m_0$  ускоряется в электрическом поле и, пройдя разность потенциалов  $U$ , приобретает скорость  $V$ . Эту скорость можно определить из закона сохранения энергии, имеющего в случае нерелятивистских скоростей ( $V \ll c$ ), следующий вид:

$$\frac{m_0 V^2}{2} = eU , \quad (5.7)$$

где  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона.

Если скорость электрона  $\vec{V}$  перпендикулярна  $\vec{B}$ , что осуществляется в данной лабораторной работе, то электрон будет двигаться по окружности радиуса  $r$ , определенного по формуле (5.6).

При отсутствии других сил, применяя второй закон Ньютона (формула (5.5)), получаем выражение для скорости электрона

$$V = \frac{|e|Br}{m_0} . \quad (5.8)$$

Подставляя в формулу (5.7) выражение для скорости  $V$  из формулы (5.8), получим соотношение для удельного заряда электрона:

$$\frac{|e|}{m_0} = \frac{2U}{r^2 B^2} . \quad (5.9)$$

Таким образом, зная радиус  $r$  траектории движения электронов в известном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , а также ускоряющую разность потенциалов  $U$ , можно вычислить отношение заряда электрона  $e$  к его массе  $m_0$ , называемое удельным зарядом электрона.

### Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки для определения удельного заряда электрона представлен на рис. 5.3.

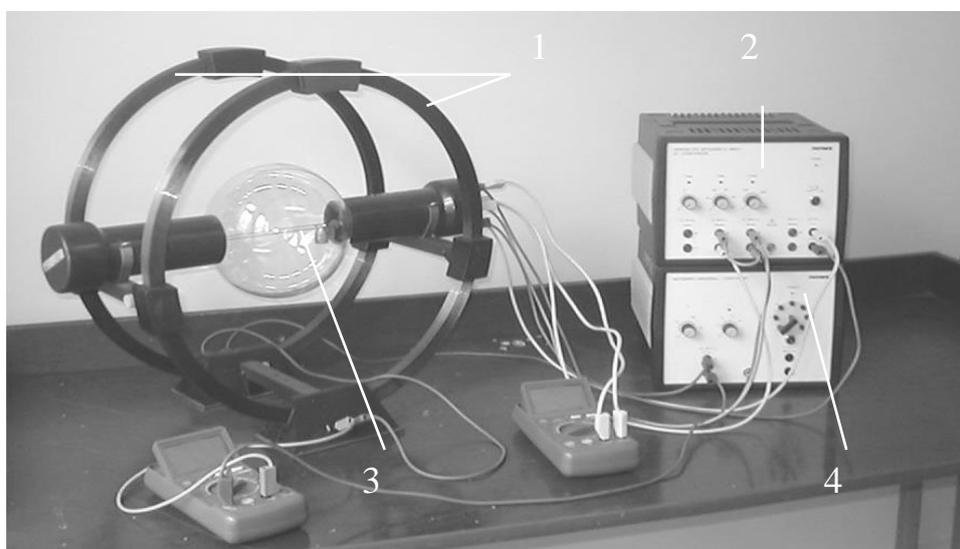


Рис. 5.3. Экспериментальная установка для определения удельного заряда электрона: 1 – катушки Гельмгольца; 2 – универсальный источник питания 0...600 В; 3 – электронно-лучевая трубка; 4 – универсальный источник питания 0...18 В.

Две катушки Гельмгольца  $I$ , расположенные параллельно друг к другу, служат для создания магнитного поля. Последовательное соединения катушек Гельмгольца создает однородное магнитное поле в центре, где располагается электронно-лучевая трубка 3.

Магнитная индукция  $B$  внутри кольцевой системы определяется по формуле:

$$B = 0,715\mu_0 \frac{nI}{R}, \quad (5.10)$$

где  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $n = 154$  – общее число витков в катушке,  $R = 200$  мм – радиус катушки Гельмгольца,  $I$  – сила тока в катушках Гельмгольца.

На рис. 5.4 показана схема электрического соединения катушек Гельмгольца.

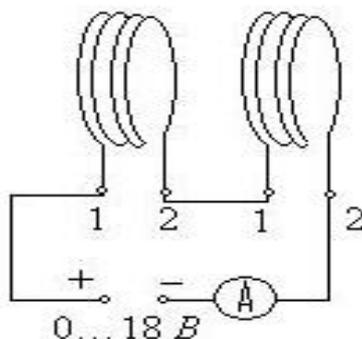


Рис. 5.4. Схема подсоединения катушек Гельмгольца к универсальному источнику питания 0...18 В.

**Внимание! Максимальное значение допустимого постоянного тока в катушках не должно превышать 5 А.**

Между катушками Гельмгольца помещена электронно-лучевая трубка, показанная на рис. 5.5.

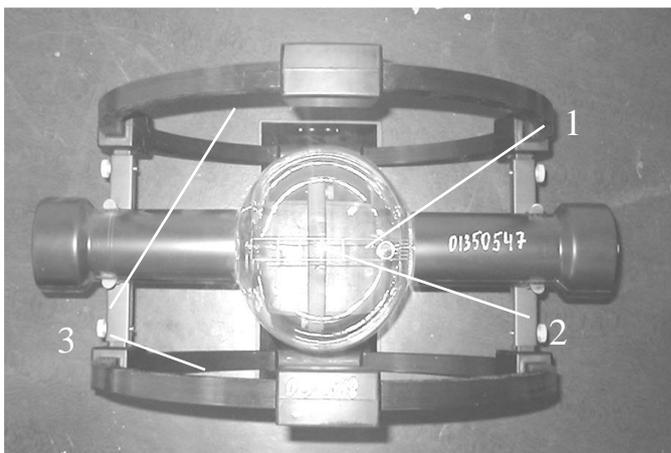


Рис. 5.5. Электронно-лучевая трубка с катушками Гельмгольца (вид сверху):  
1 – электронная пушка; 2 – шкала; 3 – катушки Гельмгольца.

Внутри электронно-лучевой трубки находится инертный газ – аргон под давлением  $10^{-1}$  Па. Электронная пушка 1 испускает электроны, которые при прохождении в аргоне создают видимое свечение фиолетового света. Внутри трубки располагается шкала 2, которая покрыта флуоресцентным веществом. При попадании на нее электронов высвечивается зеленоватая точка. По этой шкале можно определить диаметр траектории электрона: он будет равен: 4; 6; 8 или 10 см.

На рис. 5.6 показана схема подключения электронно-лучевой трубки к универсальному источнику питания 0...600 В.

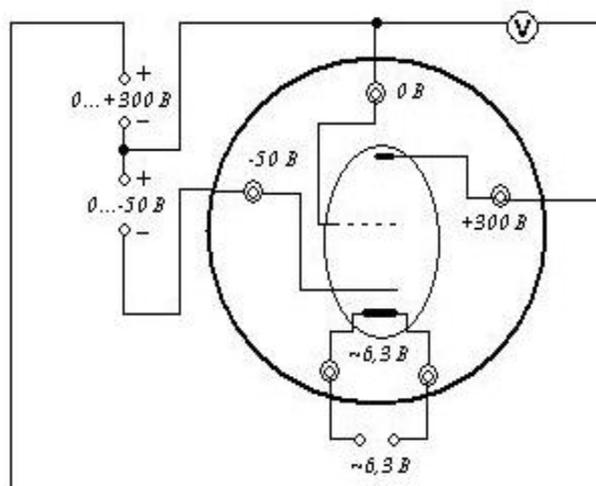


Рис. 5.6. Схема подсоединения электронно-лучевой трубки к универсальному источнику питания 0...600 В.

Технические характеристики приборов, используемых в данной лабораторной работе, должны быть занесены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Технические данные приборов**

| Прибор | Пределы измерений | Число делений | Цена деления | Класс точности | Абсолютная приборная погрешность |
|--------|-------------------|---------------|--------------|----------------|----------------------------------|
|        |                   |               |              |                |                                  |

|  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |

## Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

**Внимание! Измерения необходимо производить в затемнённой комнате, чтобы наблюдать светящуюся траекторию движения электронов.**

Работу выполняйте в такой последовательности.

1. Соберите установку для эксперимента, как показано на рис. 5.3. Подключение электронно-лучевой трубки к универсальному источнику питания 0...600 В производится согласно схеме на рис. 5.6. Далее:

соедините проводом на трубке клемму 0 В с клеммой «←» универсального источника питания с регулируемым напряжением 0...300 В;

соедините проводом на трубке клемму +300 В с клеммой «+» универсального источника питания с регулируемым напряжением 0...300 В;

соедините проводом на трубке клемму (-50) В с клеммой «→» универсального источника питания с регулируемым напряжением 0...50 В;

соедините проводом между собой клеммы «+» регулируемого напряжения 0...50 В с «←» регулируемого напряжения 0...300 В;

соедините проводами на трубке клемму ~6,3 В с клеммам ~6,3 В универсального источника питания;

соедините проводами на трубке клемму 0 В с клеммой COM (черная) мультиметра (внешний вид мультиметра представлен на рис. 5.7);

соедините проводами на трубке клемму +300 В с клеммой V/Ω/++ (красная) мультиметра;

установите переключатель 2 (рис. 5.7) в положение максимального предела вольтметра  $U$  (группа пределов 3 рис. 5.7);

включите мультиметр при нажатии кнопки 1 (рис. 5.7);

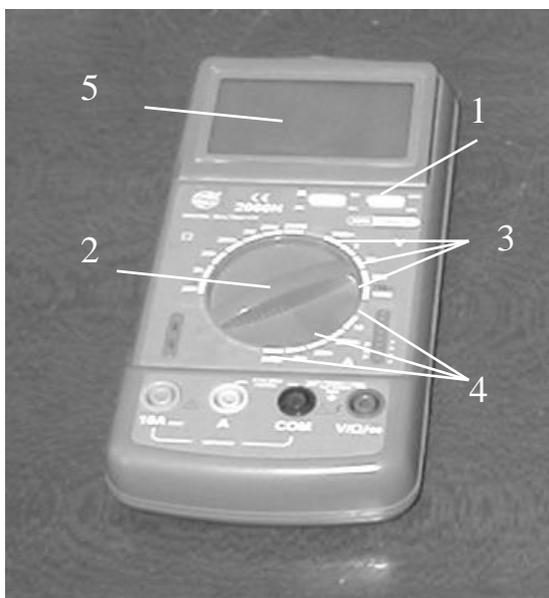


Рис. 5.7. Внешний вид мультиметра:

1 – кнопка включения, 2 – переключатель пределов измеряемых величин; 3,4 – пределы измеряемых величин, 5 – дисплей.

Для подключения катушек Гельмгольца к универсальному источнику питания  $0...18$  В (рис. 5.4):

соедините проводом клемму 1 первой катушки Гельмгольца с клеммой «+» универсального источника питания регулируемого напряжения  $0...18$  В;

соедините проводом клемму 2 первой катушки с клеммой 1 второй катушки;

соедините проводом клемму 2 второй катушки Гельмгольца с клеммой 10 А (желтая) мультиметра (рис. 5.7);

соедините проводом клемму COM (черная) мультиметра (рис.5.7) с клеммой «-» универсального источника питания регулируемого напряжения  $0...18$  В;

установите переключатель 2 (рис. 5.7) в положение максимального значения силы тока амперметра (группа пределов 4 рис. 5.7);



|     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 180 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 200 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 220 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 240 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Обработка результатов эксперимента

1. Вычислите по формуле (5.10) магнитную индукцию  $B$  внутри катушек Гельмгольца. Результат занесите в табл. 5.2.

2. Вычислите по формуле (5.9) удельный заряд электрона  $\frac{|e|}{m_o}$ . Результат занесите в табл. 5.2.

3. Вычислите среднее значение удельного заряда электрона  $\left(\frac{|e|}{m_o}\right)_{cp}$ .

4. Оцените погрешность среднего значения удельного заряда электрона по формуле:

$$\Delta\left(\frac{|e|}{m_o}\right) = \left(\frac{|e|}{m_o}\right)_{\bar{n}\bar{\delta}} \left( \frac{\Delta U}{U_{\min}} + 2\frac{\Delta r}{r_{\min}} + 2\frac{\Delta B}{B_{\min}} \right),$$

где  $\Delta U, \Delta r$  – погрешности прямых измерений напряжения  $U$  и радиуса  $r$  траектории электрона.

Погрешность определения магнитной индукции  $B$  рассчитайте по формуле:

$$\Delta B = B_{\min} \left( \frac{\Delta I}{I_{\min}} + \frac{\Delta R}{R} \right),$$

где  $\Delta I, \Delta R$  – погрешности прямых измерений силы тока  $I$  и радиуса  $R$  катушек Гельмгольца.

5. Запишите окончательный результат и сравните его с теоретическим значением

удельного заряда электрона  $\frac{|e|}{m_0}$ .

### Библиографический список

а) основной:

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн. АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2. 289 с.
2. Батурин Б.Н. Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. М.: МИСиС.1995. 38 с.
3. Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ: Учеб. пособие. М.: МИСиС, 2007. 107 с.

б) дополнительный:

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит. 2004. Т.2. 600 с.

### Контрольные вопросы

1. Какова сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$ ?
2. Чему равен вектор силы, действующей на электрический заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\vec{V}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ ? Чему равен модуль магнитной силы Лоренца?
3. Как направлена магнитная сила Лоренца по отношению к скорости заряженной частицы  $\vec{V}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$ ?
4. Чему равна сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  и в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$ ?
5. Как влияет магнитная сила Лоренца на скорость движения заряженной частицы?
6. Какова траектория движения заряженной частицы, если она влетела со скоростью  $\vec{V}$  в магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ ?
7. Как движется заряженная частица, влетевшая в однородное магнитное поле под углом  $\alpha$  к линиям магнитной индукции?
8. Какова связь в СИ характеристик магнитного поля: магнитной индукции  $\vec{B}$  и напряженности поля  $\vec{H}$ ?
9. В каких единицах в СИ измеряются магнитная индукция и напряженность магнитного поля?
10. Чему равны тангенциальное и нормальное ускорения электрона, влетевшего перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля?