

## РАБОТА 9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

**Цель работы:** изучение движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях; определение удельного заряда электрона.

#### Введение

На заряженную частицу, движущуюся со скоростью  $\vec{v}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  и в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$ , действует сила

$$\vec{F} = q[\vec{v} \vec{B}] + q\vec{E}, \quad (9.1)$$

где  $q$  – заряд частицы.

Выражение (9.1) называется формулой Лоренца. На заряженную частицу, движущуюся только в магнитном поле, действует сила

$$\vec{F} = q[\vec{v} \vec{B}], \quad (9.2)$$

которая является магнитной составляющей силы Лоренца.

В соответствии с формулой (9.2) сила Лоренца (здесь и далее будем говорить только о магнитной составляющей) перпендикулярна плоскости, в которой расположены векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , и модуль силы Лоренца тогда равен

$$F = q v B \sin \varphi, \quad (9.3)$$

где  $\varphi$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Следовательно, заряженная частица, двигающаяся вдоль силовой линии магнитного поля, не испытывает действия силы.

Направление действия силы Лоренца перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , и определяется с помощью правила правого винта и зависит от знака заряда. Если заряд  $q$  положителен, направление вектора силы  $\vec{F}_L$  совпадает с направлением вектора  $[\vec{v} \vec{B}]$  (рис.9.1,а). В случае отрицательного заряда  $q$  направления векторов  $\vec{F}_L$  и  $[\vec{v} \vec{B}]$  противоположны (рис.9.1,б).

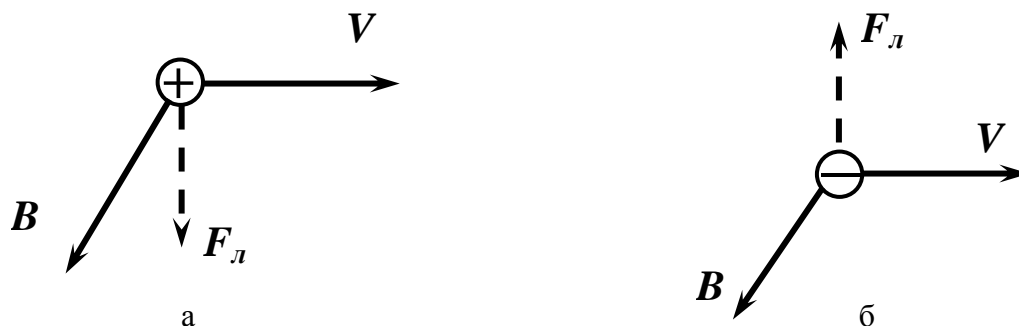


Рис.9.1

Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к скорости движения частицы. Поэтому она работы над частицей не совершает, а лишь искривляет траекторию движения частицы. Следовательно, действуя на заряженную частицу постоянным магнитным полем, изменить ее энергию нельзя.

Рассмотрим движение электрона в магнитном поле. Пусть электрон с зарядом  $e$  влетает в однородное магнитное поле со скоростью  $\vec{v}$ , перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ . Под действием силы Лоренца  $F_n = e v B$  электрон приобретает постоянное по величине нормальное ускорение

$$a_n = \frac{F_n}{m} = \frac{e}{m} v B. \quad (9.4)$$

Если скорость изменяется только по направлению, движение с постоянным по величине нормальным ускорением представляет собой равномерное движение по окружности, радиус которой определяется условием  $a_n = \frac{v^2}{R}$ . Подставляя это выражение в (9.4) получаем уравнение движения, которое по второму закону Ньютона определяется уравнением

$$e v B = m \frac{v^2}{R}, \quad (9.5)$$

решая получившееся уравнение относительно  $R$ , получаем

$$R = \frac{m v}{e B}. \quad (9.6)$$

Таким образом, в однородном поперечном магнитном поле заряженная частица движется по окружности.

Прежде чем электрон попадет в однородное магнитное поле  $\vec{B}$  со скоростью  $\vec{v}$ , он ускоряется в электрическом поле, проходя разность потенциалов  $U$  между катодом и анодом.

По закону сохранения энергии скорость  $v$  электронов, достигающих анода, определяется формулой

$$\frac{m v^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2} = eU, \quad (9.7)$$

где  $v_0$  – начальная скорость электронов. Если первоначально электрон покоился или  $v_0 \ll v$ , то

$$\frac{m v^2}{2} = eU. \quad (9.8)$$

Из уравнения (9.8) видно, что скорость электрона равна:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (9.9)$$

Подставляя скорость частицы (9.9) в формулу (9.5), получаем выражение для удельного заряда - отношения заряда частицы к ее массе –  $e/m$ :

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}. \quad (9.10)$$

Данное соотношение можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{R^2} = \frac{e}{m} \frac{B^2}{2U}. \quad (9.11)$$

Таким образом, в данной работе для определения удельного заряда электрона строится экспериментальная зависимость величины  $\frac{1}{R^2}$  от величины  $\frac{B^2}{2U}$ , определяемой ускоряющим напряжением  $U$  в электронной пушке, и величиной магнитной индукции  $B$  во внутренней области катушек Гельмгольца.

Согласно (9.11) эта зависимость носит линейный характер. Если провести линейную аппроксимацию  $\frac{1}{R^2} = k \frac{B^2}{2U}$  полученных экспериментальных значений зависимости, то коэффициент пропорциональности  $k$  прямой равен удельному заряду электрона:

$$\frac{e}{m} = k. \quad (9.12)$$

### Методика выполнения эксперимента

Экспериментальная установка (рис.9.2) состоит из непрозрачного кожуха 1, катушек Гельмгольца 2, электронной лампы 3, блока питания 4, датчика магнитного поля (датчик Холла) 5, веб-камеры 6 и концентратора для подключения датчиков к компьютеру.

В сферической лампе 1 (рис.9.3) размещена электронная пушка 2. Источником электронов является катод 1 электронной пушки (рис.9.4). Катод электронной пушки, подключенный к источнику питания, при пропускании по нему электрического тока, нагревается. В результате нагревания катода возникает термоэлектронная эмиссия, часть свободных электронов металла, обладая кинетической энергией теплового движения, достаточной для совершения работы выхода из металла, покидает его поверхность со средней кинетической энергией

$$\frac{m v_0^2}{2} \approx \frac{3}{2} kT. \quad (9.13)$$

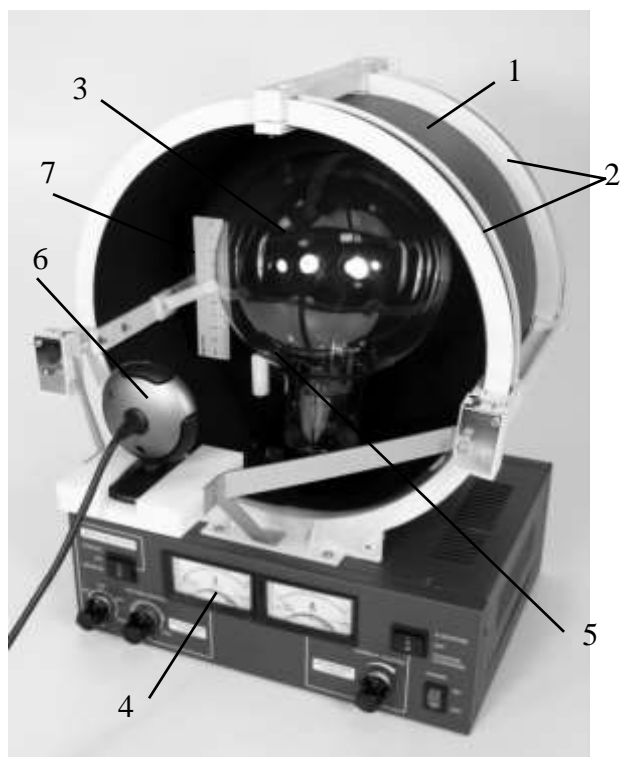


Рис.9.2



Рис.9.3

Между катодом и анодом приложена разность потенциалов  $U$ , ускоряющая электроны. В данной работе создаваемое напряжение находится в пределах  $U \sim 10^2 - 10^4$  В. Таким образом, с учетом выражения (9.13) слагаемым  $\frac{m v_0^2}{2}$  в формуле (9.7) можно пренебречь, так как  $\frac{m v_0^2}{2} \ll eU$  и с достаточной степенью точности можно полагать, что конечная скорость электронов, влетающих в однородное магнитное поле, определяется выражением (9.9).

С помощью анода 2 (рис.9.4), представляющего собой металлический конус с узким отверстием, формируется тонкий пучок «монохроматических», т.е. обладающих практически одинаковыми по величине и направлению скоростями, электронов.

Для визуализации пучка электронов, в стеклянной лампе (рис.9.3) находится газ низкого давления. Под действием электронов газ ионизируется и испускает заметное зеленоватое свечение в месте локализации пучка электронов.

При вылете из электронной пушки электроны попадают в магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца 2 (рис.9.2). Катушками Гельмгольца называется система с двумя последовательно соединенными катушками, расположенными параллельно друг другу на расстоянии приблизительно равном их радиусу. В центре системы катушек создается

область практически однородного магнитного поля, где и располагается электронная пушка.

Магнитная индукция поля  $B$  в центре системы катушек определяется по формуле

$$B = \mu_0 \left( \frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{IN}{R}, \quad (9.14)$$

где  $N$  – число витков в катушке,  $R$  – радиус катушек Гельмгольца,  $I$  – сила тока в катушках.



Рис.9.4


Магнитная индукция, ориентированная вдоль оси катушек, направлена перпендикулярно электронному пучку, генерируемому пушкой.


В состав лабораторной установки входит линейка с миллиметровой шкалой 7 (рис. 9.2). Она предназначена для установки масштаба изображения окружности, образованной светящимся газом на пути электронного пучка, зафиксированном веб-камерой.

### Порядок проведения лабораторной работы

1. Проверьте правильность подключения датчиков к компьютеру. Датчик Холла и датчик, показывающий ускоряющее напряжение электронной пушки, должны быть подключены к входу концентратора, который через USB подсоединен к входу компьютера. Веб-камера должна также через USB подключена к компьютеру.

**Установка включается в сеть только лаборантом или преподавателем.**

2. Включите компьютер и запустите программу «Физика - Практикум». На панели устройств выберите сценарий проведения эксперимента «Определение удельного заряда электрона» (кнопка  или Alt+C).


3. В окне «Устройство видеозахват» измените настройки видеозахвата, нажав на соответствующую иконку . Выберите в открывшемся окне «Формат видео» разрешение «640x480».

4. Перед началом работы переключатели «Направление тока» и «Отклоняющее напряжение» установите в нейтральное положение (положение «0»). Ручки «Ускоряющее напряжение» и «Ток в катушках» поверните против часовой стрелки в крайнее положение.


5. **Включите установку** (переключатель «Сеть») и дайте ей прогреться в течение 5 минут.

6. Направьте ток в катушках по часовой стрелке, нажав переключатель «Направление тока» вверх. Установите ток в катушках, повернув плавно ручку «Ток в катушке» по часовой стрелке в среднее положение. Изменение тока в катушках приводит к изменению магнитного поля.

7. Приложите ускоряющее напряжение на электронную пушку, повернув ручку потенциометра «Ускоряющее напряжение» по часовой стрелке в среднее положение.

8. Запустите измерения, нажав на панели инструментов кнопку  (Ctrl+S). На экране появится окно «Обработка».

9. Установите ускоряющее напряжение 220В и магнитное поле 1.8 мТл (данные значения отображаются в таблице на экране монитора).

10. Сохраните фотографию траектории движения электронов, нажав на кнопку с символом «дискета»  в окне «Обработка». При этом значения ускоряющего напряжения и индукции магнитного поля будут записаны в таблицу (рис.9.5).

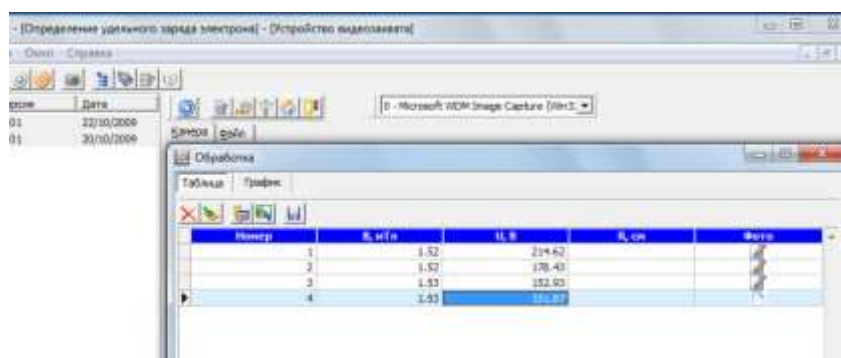



Рис.9.5


11. Повторите измерения 9÷10 при напряжениях 180 и 140 В.

12. Повторите пункты 9÷11 для магнитной индукции 1.5, 1.2 и 1.0 мТл.


13. После завершения эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «стоп»  (Ctrl+T).


14. **Выключите установку.**

15. Обработайте фотографии, получив значения радиуса траектории движения электронов при различных значениях ускоряющего напряжения и магнитного поля.

1) Войдите в режим работы с фотографией, кликнув три раза по необходимому ярлыку  в столбце «фото» таблицы результатов.

2) Задайте величину масштабного отрезка (зеленый отрезок в левом верхнем углу), сопоставив его со шкалой линейки так, чтобы он совпадал с расстоянием 10мм (рис.4).

3) Выберите на панели инструментов окна регистрации данных «Установку длины масштабного отрезка»  и введите длину масштабного отрезка (1,0). Масштабный отрезок задается только **один раз**.

4) Аппроксимируйте траекторию движения электронов окружностью, выбрав на панели инструментов соответствующую кнопку . Сопоставьте окружность с траекторией электронов (рис.9.6), при необходимости растягивая её, удерживая при этом курсор на окружности.

5) Подобрав наиболее подходящую окружность, нажмите «ОК» в верхнем правом углу окна «Фотография».

6) Повторите п.1) и пп. 4) – 5) для всех файлов в столбце «фото» таблицы результатов.

Полученные результаты запишите в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

№ измерения	Ускоряющее напряжение U, В	Магнитная индукция B, мТл.	Радиус окружности R, см	$\frac{1}{R^2}$ , м <sup>-2</sup>	$\frac{B^2}{2U}$ , Тл <sup>2</sup> /В
1					
2					
3					
...					
12					

16. По данным таблицы постройте график зависимости  $\frac{1}{R^2} \left( \frac{B^2}{2U} \right)$ .

17. По графику определите значение удельного заряда электрона и его погрешность.

18. Выйдите из программы и выключите компьютер.

19. Напишите заключение к работе.

Аппроксимация – окружность      Установка длины масштабного отрезка

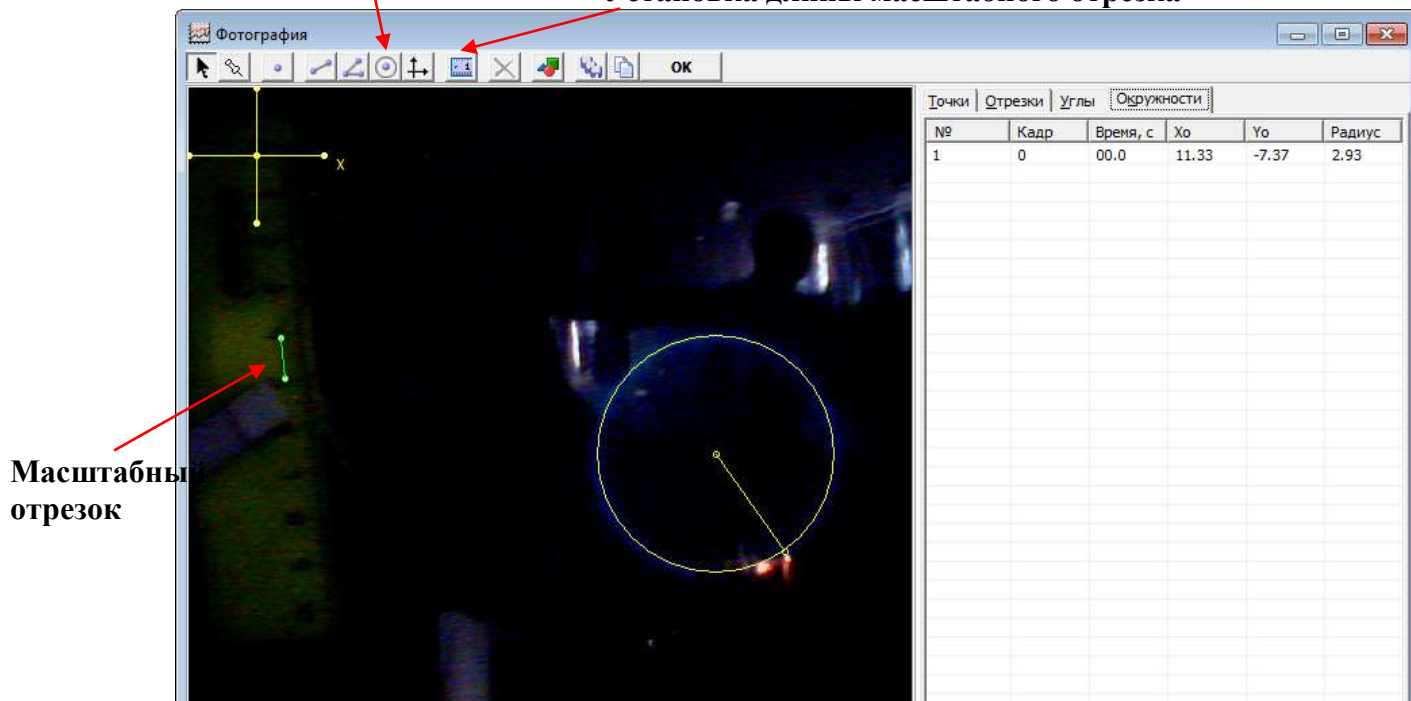


Рис. 9.6

### Контрольные вопросы

1. Как определить величину и направление силы Лоренца?
2. Как определить радиус движения электрона в однородном магнитном поле?
3. Опишите методику определения удельного заряда электрона в данной лабораторной работе.
4. Как определить величину и направление силы, действующей на частицу, движущуюся в электрическом и магнитном полях?
5. Как определить траекторию движения частицы в электрическом и магнитном полях?
6. Как влияет сила Лоренца на скорость заряженной частицы?
7. Почему для создания магнитного поля в данной работе используется не одна, а две параллельно расположенные катушки?
8. Каким образом происходит визуализация электронов в электронной лампе?