

## Лабораторная работа 31.1



## Определение удельного заряда электрона

*Методическое руководство*

# Определение удельного заряда электрона

## 1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является изучение движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

## 2. Задачи лабораторной работы

Задача состоит в экспериментальном определении удельного заряда электрона и расчете траектории движения

## 3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности



Лабораторный стенд (рис.1) представляет собой заключенные в непрозрачный кожух 1 систему катушек Гельмгольца 2, внутри которой установлена электронная лампа 3 с электронной пушкой. В установку входят блок питания электронной пушки и катушек Гельмгольца 4.

К приборам и принадлежностям относятся компьютер, необходимое программное обеспечение, датчик магнитного поля (датчик Холла) 5, веб-камера 6, измерительные кабели и концентратор (HUB USB) для подключения датчиков и веб-камеры к компьютеру.

Рис.1

## 4. Теоретическая часть

Катод 1 электронной пушки (рис.2 а, в), подключенный к источнику питания, при пропускании по нему электрического тока, накаливается и, в результате термоэлектронной эмиссии, испускает электроны со средней кинетической энергией

$$\frac{m v^2}{2} \approx \frac{3}{2} kT$$

Между катодом и анодом приложена разность потенциалов  $U$ , ускоряющая электроны. По закону сохранения энергии скорость  $v$  электронов, достигающих анода, определяется формулой

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = eU \quad (1)$$

При  $U \sim 10^2 - 10^4$  В  $\frac{mv_0^2}{2} \ll eU$  и с достаточной степенью точности можно полагать, что

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (2)$$

Отсюда скорость вылета электронов из электронной пушки равна:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (3)$$

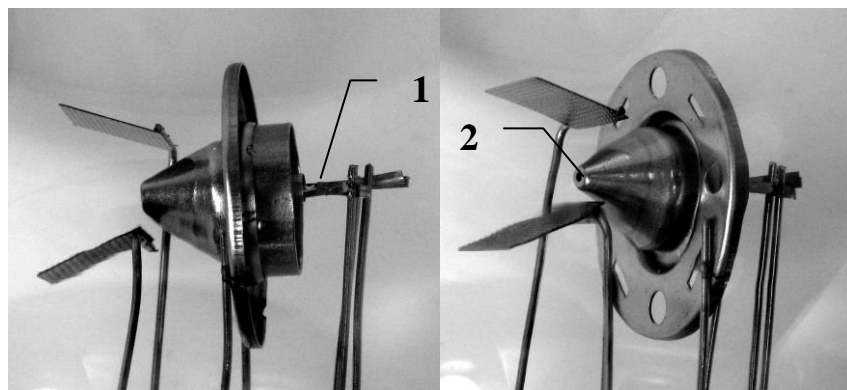


Рис.2

а)

в)

Анод 2 электронной пушки (рис.2) – металлический конус с узким отверстием. Это отверстие выделяет тонкий пучок «монохроматических»,

т.е. обладающих практически одинаковыми по величине и направлению скоростями, электронов. Так устроена электронная пушка или электронный прожектор в лабораторной установке.

Газ низкого давления, находящейся в стеклянной колбе лампы (рис.3), в которой располагается электронная пушка, под действием пучка электронов ионизируется и испускает заметное зеленоватое свечение в месте локализации пучка электронов.



Помещенная в центр системы катушек Гельмгольца лампа с электронной пушкой находится в области с однородным магнитным полем. Магнитная индукция, ориентированная вдоль оси катушек, направлена перпендикулярно электронному пучку, генерируемому пушкой.

На заряд  $e$ , движущийся со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , магнитное поле действует с силой

$$\vec{F} = [\vec{v}, \vec{B}] \quad (4)$$

Эта сила называется силой Лоренца. В соответствии с формулой (4) сила Лоренца перпендикулярна плоскости, в которой расположены векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , модуль силы Лоренца равен

$$F_L = evB \sin \varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол между векторами  $v$  и  $B$ . 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  $\vec{B}$ . Если заряд  $e$  положителен, направление вектора силы  $\vec{F}_L$  совпадает с направлением вектора  $[\vec{v}, \vec{B}]$ . В случае отрицательного  $e$  направление векторов  $\vec{F}_L$  и  $[\vec{v}, \vec{B}]$  противоположны. Для определения направления силы Лоренца, действующей на положительный заряд, можно пользоваться правилом буравчика либо правилом левой руки.

Правило левой руки гласит: если расположить левую руку так, чтобы вектор  $\vec{B}$  входил в ладонь, а четыре сложенных пальца были направлены вдоль вектора  $\vec{v}$ , то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на положительный заряд. В случае, когда заряд

отрицателен, найденное таким способом направление силы  $F_L$  надо поменять на обратное.

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

Пусть заряд  $e$  влетает в однородное магнитное поле со скоростью  $v$ , перпендикулярной вектору  $B$ . Под действием силы Лоренца

$$F_L = e v B$$

заряд приобретает постоянное по величине нормальное ускорение

$$a_n = \frac{F_L}{m} = \frac{e v B}{m} \quad (6)$$

Если скорость изменяется только по направлению, движение с постоянным по величине нормальным ускорением представляет собой равномерное движение по окружности, радиус которой определяется условием  $a_n = v^2/R$ . Подставляя это выражение в (6) получим уравнение движения, которое по второму закону Ньютона определяется уравнением

$$e v B = m \frac{v^2}{R}, \quad (7)$$

решая получившееся уравнение относительно  $R$ , получим

$$R = \frac{m v}{e B} \quad (8)$$

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

Подставляя скорость частицы (формула 3) в (8), получим выражение для удельного заряда - отношения заряда частицы к ее массе –  $e/m$ :

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}, \quad (9)$$

откуда

$$\frac{1}{R^2} = \frac{e}{m} \cdot \frac{B^2}{2U} \quad (10)$$

Как следует из формулы (10) радиус окружности  $R$ , по которой изгибается электронный пучок в магнитном поле (рис.4), зависит от ускоряющего

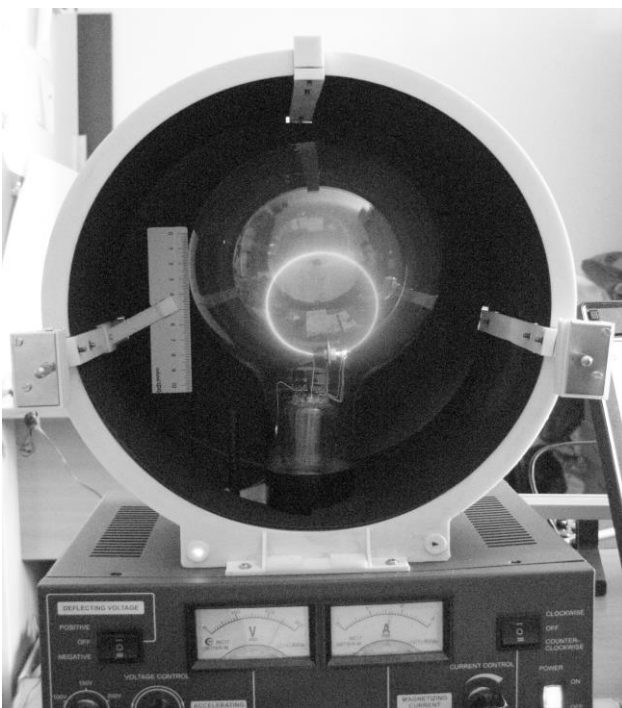


Рис.4

напряжения  $U$ , магнитной индукции  $B$  поля и удельного заряда частицы (отношения заряда частицы к ее массе –  $e/m$ ).

Идея эксперимента сводится к построению ряда экспериментальных точек зависимости величины  $\frac{1}{R^2}$  (радиус траектории электронов измеряется с помощью веб-камеры) от величины  $\frac{B^2}{2U}$ , определяемой ускоряющим напряжением  $U$  в электронной пушке, и величиной магнитной индукции  $B$  во внутренней области катушек Гельмгольца.


Согласно (10) эта зависимость должна быть линейна. Если провести линейную аппроксимацию  $\frac{1}{R^2} = k \cdot \frac{B^2}{2U}$  полученных экспериментальных значений зависимости, то коэффициент пропорциональности  $k$  оптимальной прямой равен удельному заряду электрона:


$$\frac{e}{m} = k. \quad (11)$$

## 5. Описание лабораторной установки

Кроме перечисленных в разделе 3 компонентов, в состав лабораторной установки входит линейка с миллиметровой шкалой 7 (рис. 1). Она предназначена для установки масштаба изображения окружности, образованной светящимся газом на пути электронного пучка. Установка имеет откидывающийся светозащитный экран, позволяющий улучшить условия фотосъемки траектории электронного пучка.

## 6. Порядок проведения лабораторной работы

1. Соберите лабораторную установку, подключив датчики и веб-камеру к USB входам компьютера.
2. Включите прибор (переключатель «Сеть») и дайте ему прогреться в течение 5 минут. Убедитесь, что переключатель направления тока в катушках установлен в нейтральное положение.
3. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по общей физике». На панели устройств выберете «Атомная физика» и соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C) .
4. В окне «Устройство видеозахвата» выберете «USB Camera».
5. На передней панели корпуса установки поставьте нулевое значение тока в катушках Гельмгольца вращением соответствующей рукоятки против

часовой стрелки до упора. В программе в верхней части окна регистрации индукции магнитного поля «0:K302» нажмите кнопку  для установки нуля в калибровке датчика.






6. Направьте ток в катушках по часовой стрелке (переключатель направления тока — вверх) и установите максимальный ток в катушках, повернув регулятор тока на передней панели корпуса установки до упора вправо.
7. Приложите максимальное ускоряющее напряжение на электронную пушку, повернув соответствующий регулятор на передней панели корпуса установки.
8. Поворачивая электронную лампу вокруг вертикальной оси, получите траекторию электронов в виде спирали, направленной в вашу сторону и от вас. Для проведения измерений установите лампу таким образом, чтобы вектор скорости электронов был направлен перпендикулярно направлению магнитного поля, что приведет к траектории электронов в виде окружности.
9. На передней панели кожуха установки установите нулевое значение ускоряющего напряжения и нулевое поле, повернув соответствующие регуляторы в крайнее левое положение (против часовой стрелки).
10. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения» (Ctrl+S) . На экране появится окно «Обработка».
11. Сделайте первую фотографию с открытым защитным кожухом установки, так чтобы линейка была хорошо освещена внешним светом, нажав на кнопку с символом «дискета»  (при этом все данные и фото запишутся в таблицу).
12. Закройте защитный кожух установки.
13. Проведите измерения радиуса траектории при различных значениях ускоряющего напряжения и магнитного поля. Для этого изменяя ускоряющее напряжение (от максимального до примерно 100 В, при котором электронная пушка прекращает работать) и индукцию магнитного поля, сохраняйте фотографии траектории движения электронов, значение ускоряющего напряжения и индукции магнитного поля, нажимая на кнопку с символом «дискета»  (окно обработки данных) после каждого изменения ускоряющего напряжения или индукции. Все данные будут записываться в таблицу, вид которой представлен в таблице 1. **Измерения проведите при трех значениях ускоряющего напряжения, для каждого из которых регистрируйте радиус траектории движения электронов при 3 – 4 различных значениях магнитной индукции (тока в катушках).**
14. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «стоп» (Ctrl+T) .

Таблица 1

№ измерения	Ускоряющее напряжение U, В	Магнитная индукция B, мТл.	Радиус окружности R, см	фото
1				

## 7. Обработка результатов измерений

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

1. Для определения масштаба регистрации траектории электронов войти в режим работы с фотографией, кликнув три раза по необходимому ярлыку в столбце «фото» таблицы результатов (первая строка таблицы).
2. Задать величину масштабного отрезка (отрезок зеленого цвета), совместив его концы с делениями шкалы на изображении так, чтобы он совпадал с наибольшим расстоянием, которое можно выбрать на линейке (80мм).
3. Выбрать на панели инструментов окна регистрации данных «Установку длины масштабного отрезка» и ввести длину масштабного отрезка в сантиметрах (8,0).
4. Перейти к обработке следующей фотографии и, вызвав ее на экран, аппроксимировать траекторию движения электронов окружностью. Для этого выбрать на панели инструментов соответствующую кнопку, нарисовать окружность и подбирая ее радиус и положение центра, совместить окружность с траекторией электронов. Изменение параметров окружности производить, удерживая курсор на окружности, в ее центре или на конце обозначенного радиуса.
5. Подобрав наиболее подходящую окружность, перейти в таблицу результатов. Нажать ОК в верхнем правом углу окна «Камера».
6. Повторить пп. 5 – 6 для всех файлов в столбце «фото» таблицы результатов.
7. Перейти на вкладку «график» и построить зависимость
 
$$\frac{1}{R^2} = F\left(\frac{B^2}{2U}\right).$$
8. Выполнить аппроксимацию прямой пропорциональной зависимостью, нажав соответствующую кнопку  на панели инструментов в окне «Обработка».
9. На основе полученного углового коэффициента прямой получить значение удельного заряда электрона.



## **8. Контрольные вопросы**

1. Как определить величину и направление силы Лоренца?
2. Как определить радиус движения электрона в однородном магнитном поле?
3. Как определить величину и направление силы, действующей на частицу, движущуюся в электрическом и магнитном полях?
4. Как определить траекторию движения частицы в электрическом и магнитном полях?