



ФИЗИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
Государственное образовательное
учреждение лицей № 1547



Лабораторная работа
Определение удельного заряда электрона

Под редакцией Богданова Г.С.

Москва 2013

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

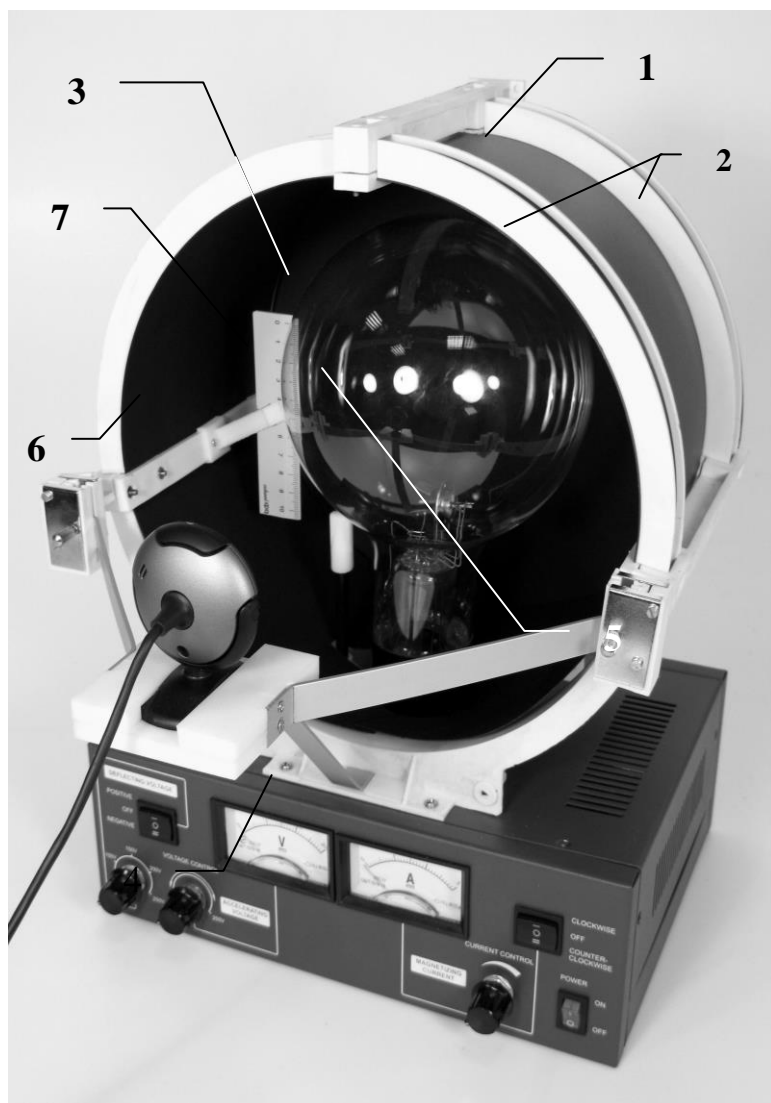


Рис.1

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, измерительный кабель и концентратор для подключения датчиков к компьютеру.

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

$$\frac{mv^2}{2} \approx \frac{3}{2} kT$$

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:

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

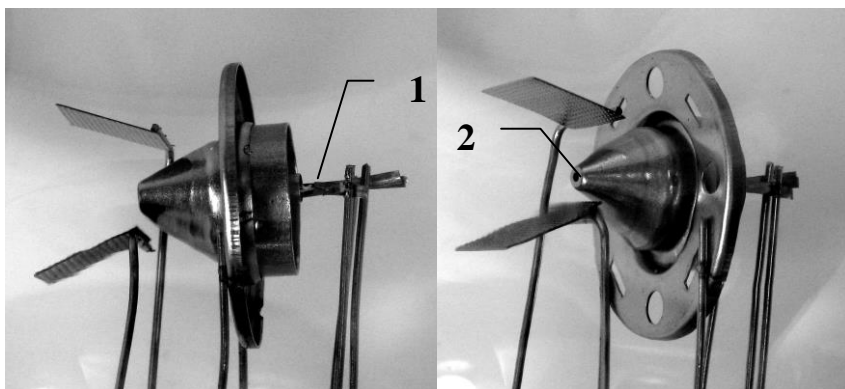


Рис.2

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.



Рис.3

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 φ – 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

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

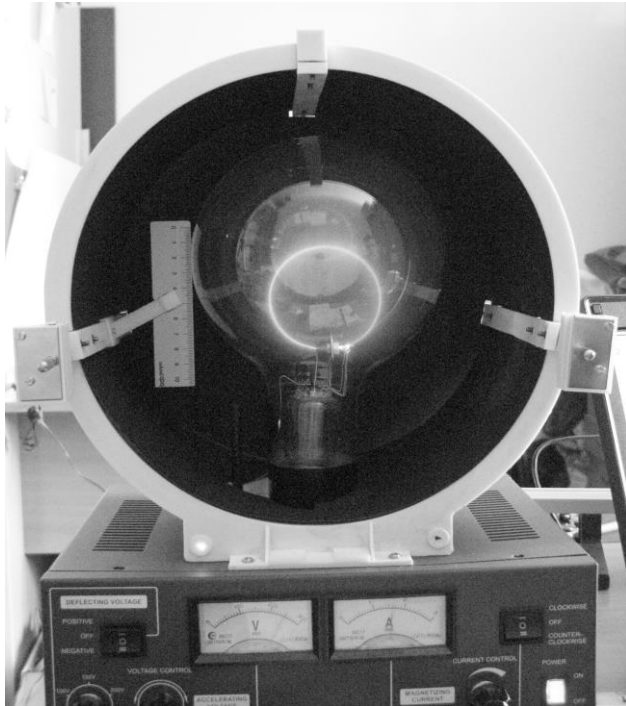
решая получившееся уравнение относительно R , получим

$$R = \frac{mv}{eB} \quad (8)$$

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 :

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{RB^2} \quad (9)$$



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

Рис.4

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, зафиксированном веб- камерой.

6. Порядок проведения лабораторной работы


1. Соберите лабораторную установку, подключив датчик Холла к входу концентратора, подсоединив последний к USB – входу компьютера. Подключите к компьютеру веб- камеру. К другому входу концентратора подключите датчик, показывающий ускоряющее напряжение электронной пушки.
2. Включите прибор (переключатель «Power») и дайте ему прогреться в течение 5 минут.
3. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберете соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C) .
4. 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.
5. Приложите ускоряющее напряжение на электронную пушку, повернув соответствующий регулятор на передней панели корпуса установки.
6. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения». На экране появится окно «Обработка».
7. Изменяя ускоряющее напряжение (от 250 до 100 В), сохраняйте фотографии траектории движения электронов, значение ускоряющего напряжения и индукции магнитного поля, нажимая на кнопку с символом «дискета» после каждого изменения ускоряющего напряжения. Все данные будут записываться в таблицу, вид которой представлен в таблице 1.
8. Повторите измерения ускоряющего напряжения и радиуса траектории движения электронов для различных значений магнитной индукции, которая изменяется при уменьшении тока в катушках.
9. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «стоп» .

Таблица 1

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

7. Обработка результатов измерений

1. Обработать фотографии, получив значения радиуса траектории движения электронов при различных значениях ускоряющего напряжения и магнитного поля.
2. Для этого войти в режим работы с фотографией, кликнув три раза по необходимому ярлыку в столбце «фото» таблицы результатов.

Лабораторная работа “Определение удельного заряда электрона”

3. Задать величину масштабного отрезка, сопоставив его со шкалой на изображении так, чтобы он совпадал с расстоянием 10мм.
4. Выбрать на панели инструментов окна регистрации данных «Установку длины масштабного отрезка» и ввести длину масштабного отрезка (1,0).
5. Аппроксимировать траекторию движения электронов окружностью, выбрав на панели инструментов соответствующую кнопку. Сопоставить окружность с траекторией электронов, при необходимости растягивая, удерживая курсор на окружности.
6. Подбрав наиболее подходящую окружность, перейти в таблицу результатов. Нажать ОК в верхнем правом углу окна «Камера».
7. Повторить п. 2 и пп. 5 – 6 для всех файлов в столбце «фото» таблицы результатов.

8. Построить зависимость $\frac{1}{R^2} \left(\frac{B^2}{2U} \right)$.

9. Выполнить аппроксимацию линейной зависимостью, нажав соответствующую кнопку на панели инструментов в окне «Обработка».
10. Перейти в окно «Статистика».
11. Получить значение удельного заряда электрона.

8. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".
3. Осторожно обращайтесь со стеклянной лампой.
4. Установка включается в сеть только лаборантом или преподавателем.
5. При неисправности установки ее следует немедленно выключить и сообщить об этом лаборанту или преподавателю. Строго запрещается производить исправления неполадок установки самостоятельно.
6. Обязательно выполнение общих правил по технике безопасности при работе в лаборатории "Электричество".

9. 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?

10. Дополнительные источники

1. Приложение 1. Оценка погрешности измерений.
2. Приложение 2. Датчики, интерфейсы, программное обеспечение