

**Лабораторная работа №11**  
**Определение удельного заряда электрона<sup>1</sup>**  
**методом магнитной фокусировки электронных пучков**

**Цель работы:** усвоить физическую сущность метода магнитной фокусировки и определить удельный заряд электрона.

**Приборы и принадлежности:**



осциллограф с вынесенной ЭЛТ,  
помещённой в соленоид



регулятор напряжения школьный  
(РНШ)



источник ВС-24М



соединительные провода



амперметр-Э514, 1-2А



реостат 30 Ом, 5 А  
(опционально)

<sup>1</sup> Работа восстановлена в 2014 году. Компьютерный вариант подготовлен студентом ТулГУ Романовым Романом Романовичем. Научный руководитель Романов Р.В. – 2016.

## Теоретическое введение

Отношение заряда частицы к её массе называется удельным зарядом. Эта величина экспериментально определяется значительно проще, чем заряд и масса частицы в отдельности. Существуют различные способы определения удельных зарядов частиц. В данной работе используется метод магнитной фокусировки электронных пучков.

Движение частицы можно найти, используя второй закон Ньютона

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \left\{ \vec{E} + [\vec{v}\vec{B}] \right\}, \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad (11.1)$$

где в правой части – сила Лоренца.

Точное решение системы этих дифференциальных векторных уравнений (или 6-и скалярных), вообще говоря, достаточно сложное занятие, так как напряжённость и индукция могут быть функциями как координат, так и времени.

Ограничимся простым случаем, когда  $\vec{E} = 0$ ,  $\vec{B}(0,0,B_z)$ , где  $B_z = const$ , то есть электрического поля нет вообще, а магнитное – постоянное и однородное.

Первое уравнение из (11.1) запишется как

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} [\vec{v}\vec{B}] = \frac{q}{m} \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & B_z \end{vmatrix}, \quad (11.2)$$

откуда следует система скалярных уравнений

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{q}{m} v_y B_z, \quad \frac{dv_y}{dt} = -\frac{q}{m} v_x B_z, \quad \frac{dv_z}{dt} = 0. \quad (11.3)$$

Очевидно, что  $v_z = const$ , то есть вдоль оси  $OZ$  частица движется равномерно и прямолинейно. Первые два уравнения связаны между собой в систему.

Домножим (11.2) на  $\vec{v}$ .

$$\vec{v} \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} \left( \vec{v} [\vec{v}\vec{B}] \right) = 0,$$

так как  $\vec{v} \perp [\vec{v}\vec{B}]$ . Следовательно,

$$\vec{v} \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{v^2}{2} \right) = 0, \quad \frac{v^2}{2} = const,$$

то есть постоянна кинетическая энергия. Магнитная составляющая силы Лоренца не совершает работы, так как она всё время перпендикулярна скорости. Нет работы, следовательно, не меняется магнитный поток, значит, площадь фигуры, охваченной траекторией частицы, постоянна.

Продифференцируем ещё раз первое уравнение из (11.3) и воспользуемся вторым уравнением.

$$\frac{d^2 v_x}{dt^2} = \frac{q}{m} \frac{dv_y}{dt} B_z = -\frac{q^2}{m^2} B_z^2 v_x, \quad \text{или} \quad \frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega^2 v_x = 0.$$

Аналогично можно поступить и со вторым уравнением. Уравнения хотя и стали второго порядка, но зато линейные, однородные, с постоянными коэффициентами. Решения их известны

$$v_x = v_{0x} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{и} \quad v_y = v_{0y} \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Гармонический вид имеют и уравнения для координат. Ясно, что это движение по окружности в плоскости  $XOY$  с циклической частотой, которая называется циклотронной, периодом и радиусом окружности, который называется ларморовским

$$\omega = \frac{|qB_z|}{m}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{|qB_z|}, \quad R = \frac{v_{\perp} T}{2\pi} = \frac{v_{\perp} m}{|qB_z|}. \quad (11.8)$$

Здесь  $v_{\perp} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ . Отметим, что частота и период не зависят от скорости, следовательно, не зависят и от кинетической энергии частицы.

Приведём 2 варианта рисунка траектории: объёмный и плоский.

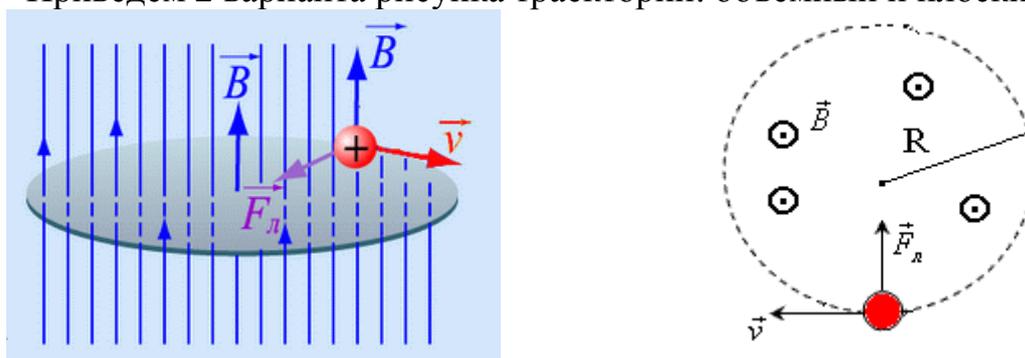


Рис. 11.1

Так как вдоль оси  $OZ$  частица движется равномерно, то результирующее движение, как сумма двух движений, даст в итоге винтовую линию (рис. 11.2), шаг которой определяется как *расстояние, пройденное вдоль оси  $OZ$  за один оборот*

$$h = v_z T = \frac{2\pi v_{\parallel} m}{|qB_z|}. \quad (11.9)$$

Также приведём рисунки: объёмный (качественный) и в двух плоскостях (расчётный) (рис. 11.2). Таким образом, если частица влетает под углом к магнитному полю, то

$$v_{\perp} = v_0 \sin \alpha, \quad v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha.$$

А характеристики траектории определяются из (11.8) и (11.9). Также

$$\frac{R}{h} = \frac{v_{\perp}}{2\pi v_{\parallel}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2\pi}. \quad (11.10)$$

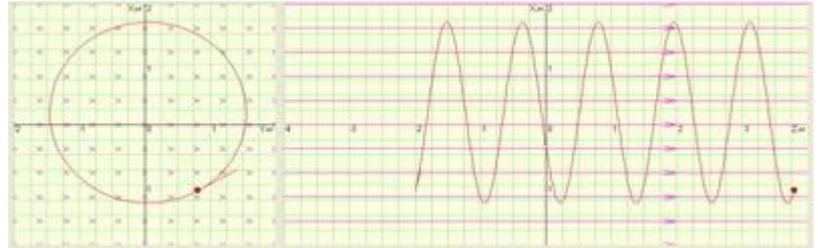
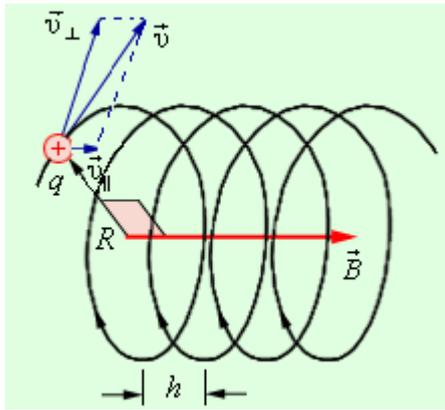


Рис. 11.2

В ЭЛТ электроны разгоняются в электрическом поле, которое создаётся анодным напряжением  $U$ , и приобретают продольную скорость, которую можно определить из закона сохранения энергии

$$\frac{mv_{\parallel}^2}{2} = |e|U, \quad v_0 = \sqrt{\frac{2|e|U}{m}}. \quad (11.11)$$

Подставляя формулу для скорости электрона и выражая удельный заряд, имеем

$$\frac{|e|}{m} = \frac{8\pi^2 U}{h^2 B^2}. \quad (11.12)$$

Магнитное поле в ЭЛТ создаётся с помощью длинного соленоида. Данное поле внутри соленоида практически однородно и определяется по формуле

$$B = \mu\mu_0 I n, \quad (11.13)$$

где  $\mu = 1$  – магнитная проницаемость среды в ЭЛТ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $I$  – сила тока в обмотке соленоида,  $n$  – число витков на единицу длины соленоида. В итоге имеем

$$\frac{|e|}{m} = 8U \left( \frac{\pi}{\mu_0 I n h} \right)^2 = \frac{U}{2} \left( \frac{1}{I n h} \right)^2 10^{14}. \quad (11.14)$$

В работе генерирование электронного пучка, его ускорение в продольном электрическом поле, отклонение на малые углы перпендикулярным электрическим полем и фокусировка продольным магнитным полем осуществляется в электроннолучевой трубке (ЭЛТ) осциллографа, помещённой внутрь соленоида (рис. 11.3).

Пучок электронов генерируется катодом трубки  $K$  и с помощью фокусирующей системы трубки преобразуется в параллельный пучок с осью, совпадающей с осью  $Z$ . В промежутке между катодом  $K$  и анодом  $A$  электроны ускоряются продольным электрическим полем напряжением  $U$  до скорости  $v_0$ .

Если на управляющие пластины трубки не подано напряжение и через соленоид не течёт ток, то электроны ударяются об экран трубки в его центре и создают светящееся пятно.

Если подать на управляющие пластины переменное напряжение, то электроны будут отклоняться

этим поперечным переменным полем на некоторые углы, и на экране осциллографа вместо точки будет наблюдаться линия.

Если теперь включить продольное магнитное поле, постепенно увеличивая его, линия на экране начнёт поворачиваться и одновременно сокращаться, стягиваясь в точку. Фокусировка наступит при таком токе через соленоид, когда на длине  $l$  от управляющих пластин до экрана трубки уложится один виток винтовой линии, то есть  $l = h_1$ . Дальнейшее увеличение тока через соленоид приведёт к расфокусировке электронного пучка. Фокусировку можно повторить при большем токе, когда на длине  $l$  уложится два витка винтовой линии  $l = 2h_2$  три витка  $l = 3h_3$  и так далее.

$$\frac{|e|}{m} = \frac{U}{2} \left( \frac{N}{I_N n l} \right)^2 10^{14}, \quad (11.15)$$

где  $N = 1, 2, 3, \dots$  – количество витков винтовой линии.

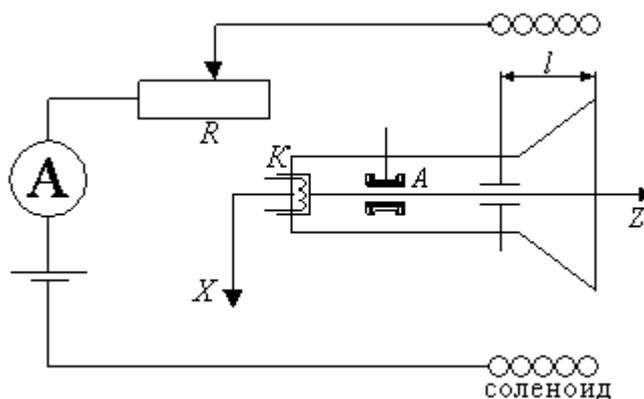


Рис.11.3



Рис.11.4.

Общий вид установки

**Лабораторная работа №11**  
**Определение удельного заряда электрона**  
**методом магнитной фокусировки электронных пучков**

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
 Проверил \_\_\_\_\_  
 Показания сняты \_\_\_\_\_  
 Зачтено \_\_\_\_\_

**Порядок выполнения работы**

Параметры установки:

$U = (1400 \pm 10) \text{ В}$  – анодное напряжение на ЭЛТ;

$l = (10,0 \pm 0,1) \text{ см}$  – расстояние от управляющих пластин до экрана трубки;

$n = (155 \pm 5) \text{ см}^{-1}$  – число витков на единицу длины соленоида.

1. Соединить последовательно в замкнутую цепь ВС-24м, амперметр, реостат (необязательно), соленоид ЭЛТ, как показано на схеме рис. 11.3.

*Примечание: Использовать правые клеммы на ЭЛТ.*

2. Регуляторы напряжения РНШ и ВС-24м должны быть повернуты против часовой стрелки до упора (минимум напряжения).

3. Включить сетевые вилки осциллографа, РНШ, ВС-24м в сеть.

4. Включить осциллограф (тумблер «Сеть» – вправо) и, регулируя яркость, фокусировку и смещение электронного луча, получить в центре экрана трубки светящееся пятно минимального диаметра.

5. Плавно поворачивая регулятор напряжения РНШ по часовой стрелке, подать на управляющие пластины вертикального отклонения ЭЛТ (сзади осциллографа) напряжение  $\approx 90 \text{ В}$ . При этом на экране трубки должна наблюдаться вертикальная линия практически до границ экрана.

6. Включить ВС-24м и, увеличивая напряжение, зафиксировать значения тока на амперметре, при которых наступает фокусировка электронного пучка (линия стягивается в точку). При необходимости изменить предел измерения прибора.

7. По полученным значениям силы тока и количеству витков винтовой линии рассчитать удельный заряд электрона по формуле (11.15).

$N$	$I_N, \text{ А}$	$ e /m, \text{ Кл/кг}$	$\Delta ( e /m), \text{ Кл/кг}$	$\varepsilon, \%$
1				
2				
3				

*Примечание: реально можно получить не более 3 витков.*

8. Получить выражение для относительной ошибки эксперимента.

9. Рассчитать относительную и абсолютную ошибку измерений.

10. Сравнить с табличным значением. Сделать выводы.

Эксперимент  $|e|/m = ( \quad \pm \quad ) \cdot 10 \text{ Кл/кг.}$

Табличное  $|e|/m = \quad \cdot 10 \text{ Кл/кг.}$

### **Контрольные вопросы**

1. Действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды. Сила Лоренца.
2. Принцип действия электронно-лучевой трубки с электростатической фокусировкой.
3. Проанализируйте случаи движения электрона в стационарных электрических и магнитных полях.
4. Получить выражение для радиуса окружности движения частицы в рамках школьного курса физики.
5. Почему при выключенном питании отклоняющих пластин магнитное поле катушки не оказывает фокусирующего действия?
6. Схема лабораторной установки и порядок работы на ней.
7. В чём сущность данного в этой лабораторной работе метода определения удельного заряда электрона?
8. Чем задаётся скорость движения электрона?

### **Литература**

(см. основной список литературы)