

УДК 53.081.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Снопкова А.А., Ворожбицкий М.И. студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники 1
г. Минск, Республика Беларусь

Курагузова О.Э. – старший преподаватель

Аннотация. В работе мы определяем значение удельного заряда электрона методом отклонения электронного луча осциллографа в поперечном магнитном поле и сравниваем его с табличным значением.

Ключевые слова. Удельный заряд электрона, осциллограф, магнитное поле.

Удельный заряд электрона e/m является одной из важнейших фундаментальных физических величин, характеризующих электрон как элементарную частицу. Данная величина показывает отношение электрического заряда электрона к его массе и широко используется в различных разделах физики, включая электродинамику, атомную физику и физику плазмы. Экспериментальное определение удельного заряда электрона играет важную роль в изучении свойств элементарных частиц и подтверждении основных законов электромагнетизма.

Существует несколько экспериментальных методов определения удельного заряда электрона. Наиболее распространёнными являются методы, основанные на исследовании движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях. В этих методах используется тот факт, что на движущуюся заряженную частицу, находящуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца, которая изменяет направление её движения. Анализируя параметры движения электрона в известных полях, можно определить отношение его заряда к массе.

В работе для определения удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка в поперечном магнитном поле используется вакуумная электронно-лучевая трубка электронного осциллографа со встроенным внутри плоским конденсатором, в которой пучок электронов отклоняется магнитным полем соленоида; стабилизированный выпрямитель В-24; мультиметр для измерения силы тока; реостат с сопротивлением 30 Ом.

На рисунке 1 представлена схема установки для определения удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка в поперечном магнитном поле. Накаливаемый катод F , помещённый в трубку, откачанную до предела, допускаемого современной техникой вакуума, является обильным источником электронов. Электроны, эмитируемые из нити накала F и ускоренные разностью потенциалов U , приложенной между катодом F и анодом A , приобретают скорость \vec{v} . Двигаясь вдоль оси трубки x , они попадают в поперечное магнитное поле, создаваемое катушкой с током K . Катушка размещена таким образом, что вектор магнитной индукции \vec{B} создаваемого ею поля направлен вдоль оси z , то есть, перпендикулярен скорости движения электронов \vec{v} .

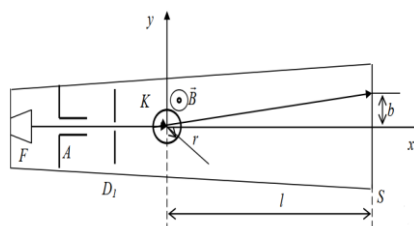


Рисунок 1. Принципиальная схема установки для определения удельного заряда электрона методом отклонения в поперечном магнитном поле

Электроны, эмитируемые из нити накала (катода) F , ускоряются в электрическом поле, создаваемом между катодом и анодом A и приобретают скорость v , величина которой удовлетворяет равенству

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

где U – ускоряющая разность потенциалов между катодом и анодом.

Вектор силы Лоренца, действующей на электрон, направлен перпендикулярно векторам \vec{v} и \vec{B} (вдоль оси y). Это следует из правила левой руки и векторного произведения в выражении для силы Лоренца. В рассматриваемом случае скорость электрона направлена вдоль оси x , а магнитное поле —

вдоль оси z , поэтому возникающая сила отклоняет электрон в направлении, перпендикулярном обоим векторам. Модуль силы Лоренца определяется выражением

$$F = evB \cdot \sin \frac{\pi}{2} = evB. \quad (2)$$

Под действием силы Лоренца скорость электрона изменяется только по направлению, электрон внутри катушки движется по дуге окружности, и изменение скорости характеризуется центростремительным ускорением. Учитывая всё вышеперечисленное второй закон Ньютона приобретает вид

$$F = ma \rightarrow evB = ma \rightarrow evB = \frac{mv^2}{R}. \quad (3)$$

Радиус дуги окружности движения электрона внутри катушки с током, определяется по формуле:

$$R = \frac{r(r+l)}{b}, \quad (4)$$

где b – отклонение электронного луча на экране.

Магнитная индукция поля, создаваемого катушкой с током, определяется по формуле:

$$B = \mu\mu_0 In, \quad (5)$$

где μ – магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная, I – сила тока в катушке, n – число витков катушки на единицу длины.

В результате расчётная формула для определения удельного заряда электрона приобретает вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{2Ub^2}{[\mu\mu_0 Inr(l+r)]^2}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения удельного заряда электрона необходимо измерить отклонение электронного луча b и силу тока в катушке I .

Для определения удельного заряда электрона мы выполнили следующие действия с установками:

1. Включили в сеть осциллограф и выпрямитель.
2. Ручками перемещения луча осциллографа $\updownarrow \leftrightarrow$ вывели электронный пучок в центр экрана осциллографической трубки (нулевое положение).
3. Отрегулировали с помощью ручек «Яркость» и «Фокус» яркость и размеры пятна на экране осциллографа.
4. Установили напряжение U_1 на выходе выпрямителя, измерили 5 раз силу тока I в катушке и величину смещения электронного луча b на экране осциллографа. Повторили эксперимент при других трёх значениях напряжения (U_2, U_3, U_4). Записали результаты измерений в таблицу 1.
5. Вычислили значение удельного заряда электрона по результатам каждого опыта по формуле 6.
6. Вычислили среднее арифметическое значение удельного заряда электрона всех результатов измерений по формуле

$$\bar{\frac{e}{m}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{e}{m}\right)_i, \quad (7)$$

где n – число опытов.

Результаты вычислений занесли в таблицу 1.

Обработка результатов измерений включала следующее:

1. Методом расчёта погрешностей прямых измерений находим относительную ε_I и полную абсолютную погрешность прямых измерений силы тока ΔI в катушке, для чего выполнили следующее:

Таблица 1. Результаты проведения экспериментов

Напряжение	Сила тока I , А	Смещение луча $b \cdot 10^{-3}$, м	Значение $e/m \cdot 10^{11}$, Кл/кг	Среднее значение $(e/m)_i \cdot 10^{11}$, Кл/кг
U_1	0,825	9	1,701	1,489
	0,827	8	1,341	
	0,822	8	1,349	
	0,820	8	1,352	
	0,825	9	1,701	
U_2	0,925	9	1,517	1,516
	0,927	9	1,514	
	0,925	9	1,517	
	0,925	9	1,517	
	0,927	9	1,514	
U_3	1,075	10	1,612	1,614
	1,072	10	1,616	
	1,062	10	1,613	
	1,062	10	1,613	
	1,072	10	1,616	
U_4	1,250	10	1,386	1,520
	1,232	10	1,406	
	1,227	10	1,412	
	1,232	11	1,702	
	1,237	11	1,695	

1.1) Определили случайные отклонения отдельных измерений и их квадраты следующим образом:
 $\Delta I = I_i - \bar{I}$; $\Delta I^2 = (I_i - \bar{I})^2$.

1.2) Используя значения, полученные ранее вычислили среднеквадратичную ошибку серии из 5 измерений по формуле

$$S_{\bar{I}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta I^2} = 1,30 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \quad (8)$$

1.3) Определили доверительные границы, за пределы которых с заданной доверительной вероятностью не выйдет истинное значение силы тока:

$$\bar{I} - \Delta I_{\text{случ}} \leq I \leq \bar{I} + \Delta I_{\text{случ}}. \quad (9)$$

1.4) Определили приборную ошибку измерений $\Delta I_{\text{пр}}$, как половину цены деления прибора, использующегося в эксперименте:

$$\Delta I_{\text{пр}} = \frac{1}{2} (\text{цен. дел.}) = 0,0125 = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \quad (10)$$

1.5) Определили полную абсолютную погрешность измерения величины I_1 :

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{случ}}^2 + \Delta I_{\text{пр}}^2} = 13,02 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \quad (11)$$

1.6) Относительную погрешность определили данным образом:

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{\bar{I}} \cdot 100\% = \frac{13,02 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,823 \text{ А}} \cdot 100\% \approx 1,6\%. \quad (12)$$

2. По аналогии вычислили погрешности измерения величин I_2, I_3, I_4, I_4 .

3. По аналогии методом расчёта погрешностей прямых измерений находим относительную ε_b и полную абсолютную погрешность прямых измерений смещения электронного луча на экране осциллографа Δb .

Погрешность полученных измерений не превышает значения относительной погрешности в лабораториях физического практикума (1-10%).

4. Определили полную абсолютную погрешность удельного заряда электрона с учётом всех погрешностей измерений, проводимых для определения значение удельного заряда электрона методом отклонения электронного луча поперечным магнитным полем.

Определили полную абсолютную погрешность косвенных измерений значения удельного заряда электрона методом отклонения электронного луча в поперечном магнитном поле по следующей формуле

$$\left(\Delta \frac{e}{m}\right)_i = \frac{2Ab}{I^2} \Delta b - \frac{2Ab^2}{I^3} \Delta I, \quad (13)$$

где $A = \frac{2U}{\mu^2 \mu_0^2 n^2 r^2 (l+r)^2} = 17,33 \cdot 10^{12}$. Результаты вычислений занесли в таблицу 2.

Таблица 2. Погрешности всех измерений, произведенных в части II

№	\bar{I}_i, A	$\Delta I_i, \text{A}$	$\bar{b}_i \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$\Delta b_i \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$\left(\frac{e}{m}\right)_i \cdot 10^{11}, \text{Кл/кг}$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right)_i \cdot 10^{11}, \text{Кл/кг}$
1	0,823	0,013	8,3	0,84	1,489	0,003
2	0,926	0,012	9,0	0,50	1,516	0,001
3	1,068	0,015	10,0	0,50	1,614	0,001
4	1,236	0,017	8,3	0,84	1,520	0,001
Среднее значение		-	-	-	1,535	-

Результаты обработки измерений величины $\frac{e}{m}$ записали в интервальной форме: $\frac{e}{m} = \left(\bar{\frac{e}{m}} \pm \Delta \frac{e}{m}\right)$ Кл/кг.

$$\frac{e}{m} = (1,535 \pm 0,003) \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}. \quad (14)$$

Далее был вычислен процент расхождения полученного среднего значения удельного заряда электрона с его табличной величиной. В качестве табличного значения использовалось $\frac{e}{m} = 1,758 \cdot 10^{11} \text{Кл/кг}$ Процент расхождения определялся по формуле

$$\delta = \frac{\left| \left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}} - \bar{\frac{e}{m}} \right|}{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{табл}}} \cdot 100\% \approx 13\%. \quad (15)$$

Все расчеты сделаны на персональном компьютере с использованием табличного процессора Microsoft Excel и программы MathCAD для уменьшения вероятности арифметических ошибок и повышения точности вычислений.

Таким образом, нами был экспериментально определен удельный заряд электрона методом отклонения электронного луча на экране осциллографа в поперечном магнитном поле. Полученное значение равно $\frac{e}{m} = (1,535 \pm 0,003) \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Процент расхождения полученного значения с табличной величиной составляет 13%. Погрешность обусловлена влиянием человеческого фактора и факторов окружающей среды, а также несовершенством экспериментальной установки. Несмотря на это, полученное значение имеет правильный порядок величины и удовлетворительно согласуется с табличными данными, что подтверждает корректность использованного метода и работоспособность экспериментальной схемы определения удельного заряда электрона.

Список используемых источников:

1. Годлевская, А. Н. Физика атома и атомных явлений / А. Н. Годлевская. – Гомель : УО «ГТУ им. Ф. Скорины», 2015. – 47 с.
2. Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума / В. А. Емельянов, Д. Л. Лин, В. Ф. Шолох. – Мн. : Бестпринт, 1997. – 90 с.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 4 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – М. : КноРус, 2012. – 576 с.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Ч. 1 : Атомная физика / Д. В. Сивухин. – М.: Наука, 1986. – 416 с.
5. Трофимова, Т. И. Курс общей физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1985. – 432 с.

UDC 53.081.6

DETERMINATION OF SPECIFIC CHARGE OF ELECTRON

Snopkova A.A., Vorozhbitsky M.I., students

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kurguzova O.E. – Senior Lecturer

Annotation. In this work, we determine the value of the specific charge of an electron by deflecting the electron beam of an oscilloscope in a transverse magnetic field and compare it with the table value, as a result of which we learn that the result obtained is included in the confidence interval.

Keywords. Specific charge of an electron, oscilloscope, magnetic field.