Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского
Радиофизический факультет

Отчет по лабораторной работе №27

Определение отношения заряда электрона к его массе

Выполнил студент 410 группы
Сарафанов Ф. Г.

Принял:
Менсов С. Н.

Нижний Новгород, 2016

1. Отчёт по лабораторной работе №27 «Определение отношения заряда электрона к его массе»

Цель работы: изучение характера движения заряженных частиц в однородном магнитном поле и определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки и методом отклонения в известных полях.

Оборудование: экспериментальная установка (ЭЛТ и блок питания), коммутатор, амперметр постоянного тока, источник питания постоянного тока

Приборные погрешности: $\Delta U = 62.6$ В, $\Delta I = 0.015$ А, $\Delta K = 0.01$ м.

1.1. Измерение удельного заряда электрона методом отклонения земным магнитным полем

В данном эксперименте ЭЛТ выставлялась так, чтобы её продольная ось была сонаправлена с линиями магнитного поля земли: известна горизонтальная составляющая поля $B_з = 0.186$ гаусса $= 1.86 \cdot 10^{-5}$ Тл и наклонение $\alpha = 70°$. Отсюда напряженность магнитного поля вдоль ЭЛТ составляет $B = \frac{B_з}{cos(\alpha)} = 6.36 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Выберем декартову систему координат так, чтобы начало координат лежало на конце второго анода, ось Z совпадала с продольной осью ЭЛТ.

Если на анод ЭЛТ подавать напряжение U_a, то из него электроны будут вылетать с кинетической энергией

$$\frac{mv_{0z}^2}{2} = U_a \cdot e$$

и скоростью

$$v_{0z} = \sqrt{\frac{2 \cdot U_a \cdot e}{m}}$$

Обозначим удельный заряд $\frac{e}{m} = \eta$. Тогда $v_{0z} = \sqrt{2U_a\eta}$.

На заряд будет действовать сила Лоренца, направленная перпендикулярно скорости электрона, закручивающая его по окружности радиуса R.

$$F_л = ma$$
$$eVB = \frac{mv_{0z}^2}{R}$$

Отсюда

$$\eta = \frac{v_{0z}}{RB}$$

Радиус можно найти по отклонению проецируемого на экран ЭЛТ пятна K, формула приближенно упрощается для $K << L_1$:

$$\eta = \frac{8K^2U_a}{B^2L^4} \tag{1}$$

Рассчитаем погрешность формулы (1):

$$\varepsilon(\eta) = \frac{2\Delta K}{K} + \frac{\Delta U}{U_a} \tag{2}$$

Проведем несколько опытов, используя противоположные направления магнитного поля и разные значения U_a.

U_a, В	α, град	K, м	$\frac{e}{m}$ (СИ)	$\varepsilon(\frac{e}{m})$	$\Delta(\frac{e}{m})$
1300	+90	0.007	$1.78 \cdot 10^{11}$	0.28	$5.10 \cdot 10^{10}$
	−90	0.006	$1.31 \cdot 10^{11}$	0.33	$4.37 \cdot 10^{10}$
1700	+90	0.005	$1.19 \cdot 10^{11}$	0.40	$4.76 \cdot 10^{10}$
	−90	0.0065	$2.01 \cdot 10^{11}$	0.30	$6.19 \cdot 10^{10}$

По данным таблицы среднеквадратичное отклонение будет составлять $5.11 \cdot 10^{10}$, среднее значение $\frac{e}{m} = 1.57 \cdot 10^{11}$.

Интервал ошибок будет составлять от $1.06 \cdot 10^{11}$ до $2.08 \cdot 10^{11}$. Этим методом нашли $\frac{e}{m}$ с точностью до порядка.

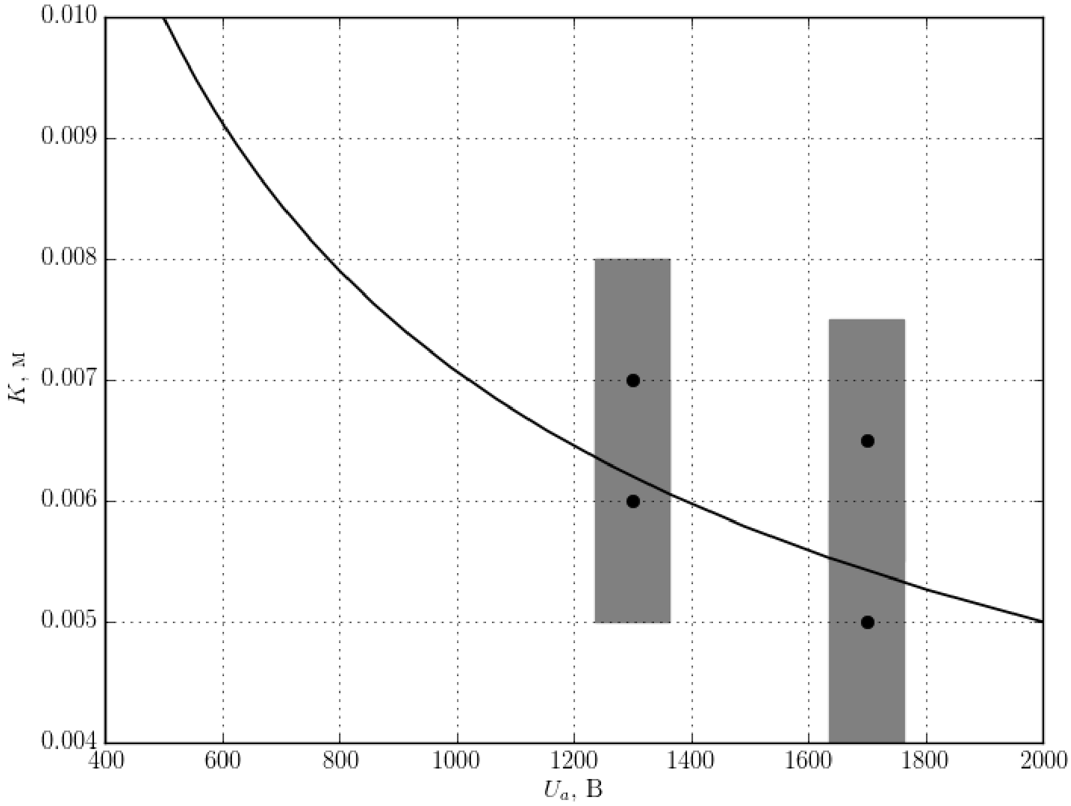

Рис. 1. Теоретическая зависимость отклонения пятна от напряжения и реальные результаты с прямоугольниками ошибок

1.2. Измерение удельного заряда электрона методом фокусировки пучка продольным магнитным полем селеноида

Если вдоль оси трубки создать постоянное магнитное поле B_z, которое можно рассчитать по формуле

$$B = \mu_0 \cdot n_0 \cdot I = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8400 \cdot I \quad (3)$$

то электронный пучок, вылетевший из электронной пушки с начальной скоростью $v_0 = \sqrt{2 \cdot U_a \cdot \eta}$, пройдет в ЭЛТ в сонаправленном продольной оси (oZ) ЭЛТ магнитном поле напряженностью $B = \mu_0 n I$.

Для того, чтобы поле Bx действовало на электрон, необходимо, чтобы его скорость имела поперечную составляющую , перпендикулярную v_z. В этом случае в плоскости XoY электрон под действием силы будет равномерно двигаться по окружности, радиус которой определится из второго закона динамики:

$$m\frac{v_0^2}{R} = ev_0B_z \tag{4}$$

$$R = \frac{mv_0}{eB_z} \tag{5}$$

На неком начальном участке пути, меньшем на порядок относительно длины трубки, пучок проходит сквозь отклоняющие пластины с напряженностью электрического поля $E = \frac{U_{\text{откл}}}{d}$, где d — расстояние между пластинами.

Если пренебречь тем, что поля скрещенные, можно предположить, что в пластинах пучок приобретает произвольную скорость, лежащую в плоскость (XoY), перпендикулярной oZ. Ясно, что он будет закручиваться магнитным полем, а так как проекция начальной скорости v_0z не изменилась, то его траектория будет представлять собой винтовую линию, нанесенную на цилиндр радиуса R, и электроны пучка будут двигаться по спирали и через время $nT = \tau$ пересекать ось oZ.

Обозначим $\eta = \frac{e}{m}$ и $\omega = \eta B_z$ (циклотронная частота). Тогда можем переписать формулу как

$$R = \frac{v_0}{\omega} \tag{6}$$

Решив несколько систем уравнений:

$$\begin{cases} nT_1v_{0z} = l \\ (n+1)T_2v_{0z} = l \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_1 = \frac{2\pi}{\eta B_1} \\ T_2 = \frac{2\pi}{\eta B_2} \end{cases}$$

Число фокусировок находится как

$$n = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{B_1}{B_2 - B_1} = \frac{I_1}{I_2 - I_1}$$

А удельный заряд определяется как

$$\eta = \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot U_a}{l^2(B_2 - B_1)^2}$$

через два опыта с последовательными n-й и n+1 фокусировками.

Нужно найти первое такое пересечение на экране ЭЛТ (n фокусировок) и увеличивать ток на соленоиде (увеличивать напряженность магнитного поля) до тех пор, пока не получим на экране (n+1 фокусировку).

$$\eta = \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot U_a}{(l \cdot \mu_0 \cdot n_0)^2 (I_2 - I_1)^2}$$

Рассчитаем погрешность формулы:

$$\Delta(\eta) = \frac{8\pi^2 \left(4U_a \Delta I \left(I_2 - I_1\right) + \Delta U \left(I_2 - I_1\right)^2\right)}{\mu_0^2 d^2 l^2 n_0^2 \left(I_2 - I_1\right)^4}$$

Где d — коэффициент перевода в систему СИ единиц тока.

Провели ряд экспериментов:

U_a, В	I_1, А	I_2, А	$\frac{e}{m}$ (СИ)	$\Delta(\frac{e}{m})$	n
1200	0.6	1.14	$1.78 \cdot 10^{11}$	$0.96 \cdot 10^{10}$	1.11
1000	0.54	1.04	$1.73 \cdot 10^{11}$	$1.12 \cdot 10^{10}$	1.08
1000	0.5	1.08	$1.81 \cdot 10^{11}$	$1.16 \cdot 10^{10}$	0.86
1100	0.46	1.08	$1.74 \cdot 10^{11}$	$1.02 \cdot 10^{10}$	0.74

По данным таблицы среднеквадратичное отклонение будет составлять $0.061 \cdot 10^{11}$, среднее значение $\frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11}$.

Доверительный интервал будет составлять от $1.70 \cdot 10^{11}$ до $1.82 \cdot 10^{11}$. Этим методом нашли $\frac{e}{m}$ так, что известное табличное значение попадает в доверительный интервал, а экспериментальное значение лежит еще ближе к известному.