



ВПВ по электродинамике и магнетизму
Лабораторная работа 3.3.3 "Опыт Милликена"

Сурженко Эдуард Б01-304

Сидорчук Максим Б01-304

Иванов Максим Б04-307

Долгопрудный, 2024 г.

Цель работы: измерить электромагнитный заряд методом масляных капель.

В работе используется: плоский конденсатор в защитном кожухе, осветитель, измерительный микроскоп, электростатический вольтметр, секундомер, переключатель напряжения, пульверизатор с маслом.

1. Методика эксперимента

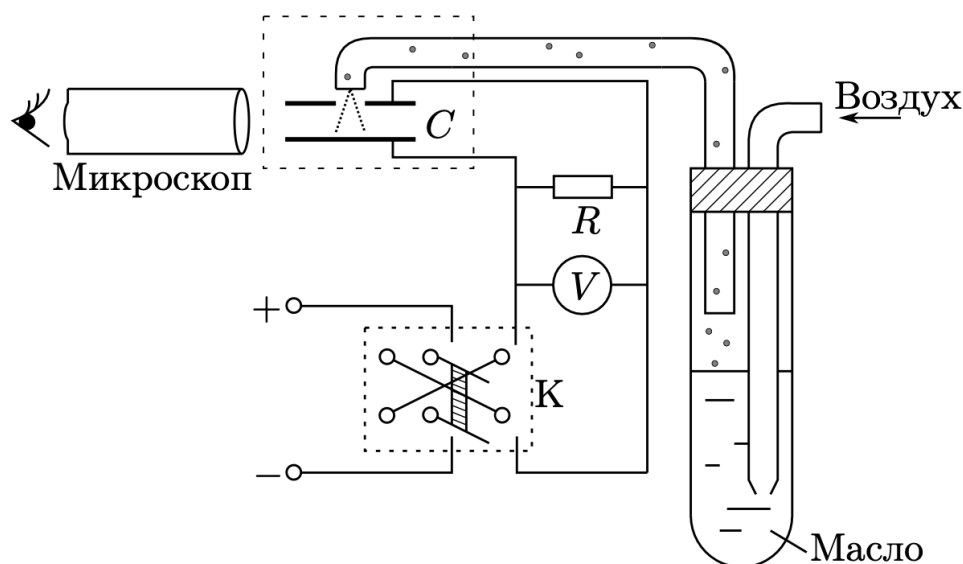


Рис. 1: Схема установки

Через маленькое отверстие верхней пластины конденсатора C разбрызгиваем капли масла. Из-за трения о воздух капли приобретают случайный по абсолютной величине и знаку электрический заряд.

Подаём на пластины конденсатора напряжение, которое будем измерять вольтметром V . Ключом K меняем направление поля в конденсаторе, чтобы можно было вернуть каплю на прежнее место и снова произвести измерение. В фокальной плоскости окуляра измерительного микроскопа виден ряд горизонтальных линий, расстояние между которыми равно 0.25 мм. Наблюдая за перемещением капли между линиями, можно определить пройденный каплей путь. Время t свободного падения капли от одной выбранной линии до другой и время t' её обратного подъёма, происходящего под действием сил электрического поля, измеряем секундомером. После размыкания ключа конденсатор разрядится через сопротивление R .

2. Теоретическое введение

Существование элементарного заряда приводит к дискретности значений заряда q :

$$q = 0, \pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots, \pm ne, \dots,$$

В данном опыте измеряется заряд малых капель масла, несущих несколько элементарных зарядов. Сравнив заряды между собой, мы убедимся в их кратности элементарному заряду e .

2.1 Уравнение движения капли

Рассмотрим свободное падение капли, применим второй закон Ньютона:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - F_{\text{тр}}, \quad (1)$$

При малых скоростях сила трения для сферической капли определяется формулой Стокса:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v = kv, \quad (2)$$

где r - радиус капли η - коэффициент вязкости трения воздуха. Подставляя (2) в (1) проинтегрируем уравнение по времени ($v_0 = 0$), получим:

$$v = v_{\infty}(1 - e^{-kt/m}), \quad (3)$$

где v_{∞} - установившаяся скорость падения

$$v_{\infty} = \frac{mg}{k} = \frac{\frac{4}{3}\pi\rho r^3 g}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9} \frac{\rho}{\eta} g r^2.$$

где ρ - плотность масла. Согласно (3), установление скорости происходит за характерное время:

$$\tau = \frac{m}{k} = \frac{v_{\infty}}{g} = \frac{2}{9} \frac{\rho}{\eta} r^2.$$

Из-за очень малого размера капли можно считать, что её движение всегда равно установившемуся.

Тогда, зная время падения капли, определим её радиус, обозначим пройденный путь через $h \approx v_{\infty}t$:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2\rho g t}}. \quad (4)$$

Теперь рассмотрим движение капли при наличии электрического поля $E = U/l$. Если капля движется против g то уравнение принимает вид:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{qU}{l} - mg - kv,$$

Дополнительная константа в правой части не изменяет постоянной времени $\theta = \frac{k}{m}$. Найдём новую установившуюся скорость, положим, что временем установления скорости можно пренебречь:

$$v'_\infty = \frac{qU}{kl} - v_\infty, \quad (5)$$

пусть $t' = h/v'_\infty$ - время подъёма капли на начальную высоту. Используя равенства (2), (4) и (5), получим окончательную расчётную формулу для заряда капли:

$$q = 9\pi \frac{l}{U} \sqrt{\frac{2}{\rho g}} (\eta h)^{3/2} \frac{t + t'}{t^{3/2} t'}. \quad (6)$$

Оценка погрешности

Дискретность заряда можно определить, если только погрешность измерения заряда много меньше элементарного заряда. Это условие легко выполнимо, если кратность заряда - n - мала. В условиях нашего опыта трудно произвести измерения с точностью лучше 5%. Поэтому необходимо, чтобы заряд капли был меньше $20e$ (оптимально — $5e$).

Проанализируем погрешность формулы ((6)). Из всех велчин, входящих в формулу ((6)), на опыте измеряются только U, t, t' . Погрешность напряжения пренебрежимо мала, поэтому погрешность измерения q определяется в основном погрешностью времени δt .

При визуальных наблюдениях фактором, определяющим величину погрешности, выступает время реакции человека, которое практически не бывает меньше $\delta t \approx 0,2$ с.

Из формулы ((6)) нетрудно определить погрешность:

$$\frac{\sigma_q}{q} = \sqrt{\frac{\sigma_U^2}{U^2} + \frac{\sigma_t^2 t_0^2}{t^2 (t_0 + t)^2} + \frac{\sigma_{t_0}^2}{4t_0^2} \left(\frac{3t + t_0}{t + t_0} \right)^2} \quad (7)$$

Из соотношения ((7)) следует, что погрешность будет минимальна, если времена t и t' — величины одного порядка. В этом случае для погрешности определения заряда имеем

$$\frac{\sigma_q}{q} = \sqrt{\frac{\sigma_U^2}{U^2} + \frac{\sigma_t^2}{4t_0^2} + \frac{\sigma_{t_0}^2}{t_0^2}}$$

3. Обработка результатов измерений

Оценим с помощью формулы (6) минимальное напряжение $U_{min} = 300$ В, такое напряжение нужно для подъёма капель, несущих 5 зарядов электрона на высоту $h = 1$ мм. Напряжения, меньше этого будут поднимать слишком сильно заряженные капли, что приведёт к неточности эксперимента и слишком большим погрешностям. **Условия эксперимента:**

Расстояние между пластинами $l = 0.725$ см, плотность масла $\rho = 0.898$ г/см³, вязкость воздуха $\eta = 1.85 \cdot 10^{-5}$ Па · с ($T = 300$ К), цена деления окуляра $b = 0.25$ мм, $U_{min} = 300$ В.

Определение величины элементарного заряда:

Для 14 капель проведём измерение их зарядов q , результаты представлены в таблице:

$N_{зар}$	$U_{конд}, В$	$t_0, с$	$t, с$	$q_{ср} \cdot 10^{-19}$ Кл	$n_{шт}$
1	(300 ± 20)	(32.68 ± 0.2)	(9.59 ± 0.2)	(6.09 ± 1.506)	4
2	(400 ± 20)	(28.88 ± 0.2)	(7.91 ± 0.2)	(5.81 ± 1.245)	4
3	(400 ± 20)	(26.48 ± 0.2)	(8.06 ± 0.2)	(6.08 ± 1.528)	4
4	(400 ± 20)	(18.46 ± 0.2)	(3.06 ± 0.2)	(17.17 ± 3.163)	10
5	(400 ± 20)	(16.11 ± 0.2)	(3.39 ± 0.2)	(17.18 ± 3.484)	10
6	(400 ± 20)	(22.47 ± 0.2)	(10.15 ± 0.2)	(5.83 ± 0.923)	4
7	(400 ± 20)	(26.26 ± 0.2)	(9.05 ± 0.2)	(5.62 ± 1.523)	3
8	(400 ± 20)	(25.44 ± 0.2)	(8.86 ± 0.2)	(5.87 ± 1.531)	4
9	(400 ± 20)	(21.69 ± 0.2)	(10.33 ± 0.2)	(5.95 ± 1.681)	4
10	(400 ± 20)	(32.03 ± 0.2)	(6.90 ± 0.2)	(6.03 ± 1.530)	4
11	(400 ± 20)	(24.04 ± 0.2)	(3.77 ± 0.2)	(12.13 ± 3.194)	7
12	(400 ± 20)	(27.91 ± 0.2)	(7.22 ± 0.2)	(6.40 ± 1.827)	4
13	(400 ± 20)	(8.72 ± 0.2)	(7.20 ± 0.2)	(1.65 ± 0.271)	1
14	(400 ± 20)	(12.24 ± 0.2)	(4.52 ± 0.2)	(16.72 ± 3.531)	10

Таблица 1: Таблица с результатами измерений

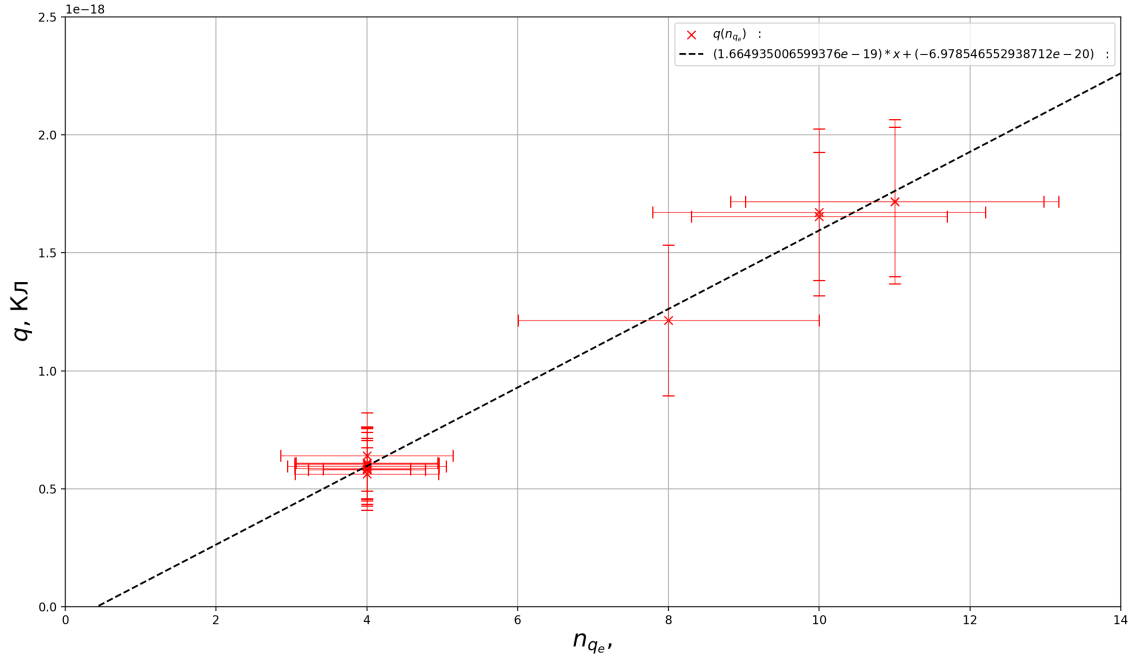


Рис. 2: График зависимости заряда капли масла от кол-ва элементарных зарядов

По наклону графика можно определить элементарный заряд электрона $|e^-| = (1.67 \pm 0.06) \cdot 10^{-19}$ Кл.

4. Сравнение с опытом Толмена

Пусть в единице объёма металла n свободных электронов. Так как движение зарядов хаотично и равновероятно, то их плотность тока равна 0. Пусть в какой-то момент возникло упорядоченное движение электронов со средней скоростью u . Тогда плотность возникшего тока через единицу площади равна:

$$j = enu$$

Рассмотрим неравномерное вращение металлогического кольца вокруг своей оси (линейная скорость равна v). Если бы свободные электроны были крепко связаны с атомами и двигались совместно, то движения положительных и отрицательных зарядов создавали бы токи равные и противоположно направленные. Если же электроны были неподвижны, то ток определялся бы только движением положительных зарядов:

$$j = -env = enu$$

Однако в действительности неравномерное движение кристаллической решётки увлекает за собой часть электронов, вследствие чего будет возникать переменный ток. Уравнение движения электронов примет вид:

$$m \frac{d}{dt}(v_w + u) = F$$

где $(v_w + u)$ - полная скорость электрона, а F - действующая на него сила. Характеризуемая столкновениями между электронами и решёткой, характеризующее сопротивление металла R и ЭДС индукции, сопротивляющаяся всякому изменению силы тока в проводнике, характеризующее индуктивностью металла L . Обе эти силы зависят от u а не от полной скорости электронов, тогда получим:

$$m \frac{du}{dt} = F(u) - m \frac{dv_w}{dt}$$

где последнее слагаемое представляет собой силу инерции относительно движущейся системы. Воспользуемся непосредственно общим уравнением переменных токов.

$$\frac{1}{c} L \frac{dJ}{dt} + RI = \oint E_s^{\text{суп}} dS,$$

приравняв сторонней силе $eE_s^{\text{суп}}$ силу инерции $\frac{dv_w}{dt}$ получим:

$$\frac{1}{c} L \frac{dJ}{dt} + RI = -\frac{m}{e} \oint \frac{dv_w}{dt} dS = -\frac{ms}{e} \frac{dv_w}{dt}$$

где s -длина кольца. Проинтегрировав по времени, получим от $t = t_1$ до $t = t_2$ полагая, что в эти промежутки ток обращается в 0.

$$R \int_{t_2}^{t_1} J dt = -\frac{ms}{e} (v_w(t_2) - v_w(t_1))$$

Этим соотношением Толмен воспользовался для определения отношения e/m в металле. Круглая проволочная катушка приводилась в движение и затем (в момент времени t_1) тормозилась и приводилась в состояние покоя ($v_w(t_2) = 0$) в течение доли секунды. В течение этого промежутка времени по катушке тёк ток, измеряемый неподвижным гальванометром. Измерив $R \int_{t_2}^{t_1} J dt$ и $v_w(t_1)$ и учтя все побочные эффекты, можно рассчитать отношение m/e для носителей тока в металле.

полученное экспериментальное значение в опытах Толмена оказалось равным:

$$m/e = 4,58 \cdot 10^{-9} \text{Г/Кл} = 1,53 \cdot 10^{-18} \text{абс. ед. СГС},$$

$$e = 1,986 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$$

Что согласуется по порядку величины со значением, полученным при измерениях над свободными электронами в катодных лучах

$$m/e = 5,66 \cdot 10^{-9} \text{Г/Кл} = 1,9 \cdot 10^{-18} \text{абс. ед. СГС},$$

$$e = 1,608 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$$

5. Вывод

1. Результат опыта Милликена

В данном опыте мы определили значение элементарного заряда методом Милликена $e^- = (1.67 \pm 0.06) \cdot 10^{-19}$ Кл, что в пределах относительной погрешности в 3.6% сходится с табличным значением.

2. Погрешности

Относительная погрешность определения элементарного заряда σ_q/q связана с задержкой реакции экспериментатора – средняя реакция человека составляет приблизительно 0.2 с, а так же неточностью показателей вольтметра, что на данной установке составило ± 20 В.

3. Сравнение с опытом Толмена

Сравнив с методом получения элементарного заряда по Толмену, мы пришли к выводу, что в нашей работе табличный заряд электрона e^- определяется точнее; относительная погрешность в опыте Милликена равняется 4.4 %, в опыте Толмена она равна 23.05 %.