

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.3.3

Опыт Милликена.

Автор:

Глеб Уваркин

615 группа

Преподаватель:

Андрей Александрович

Заболотных



15 ноября 2017 г.

Цель работы:

Измерение элементарного заряда методом масляных капель.

В работе используются:

Плоский конденсатор в защитном кожухе, осветитель, измерительный микроскоп, выпрямитель, электростатический вольтметр, переключатель напряжения, пульверизатор с маслом, секундомер.

1 Теоретические сведения.

Идея опыта очень проста. Если элементарный заряд действительно существует, то заряд q любого тела может принимать только дискретную последовательность значений:

$$q = 0, \pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots \pm ne, \dots, \quad (1)$$

где e - заряд электрона. В предлагаемом опыте измеряется заряд небольших капелек масла, несущих всего несколько электронных зарядов. Сравнивая между собой заряды капель, можно убедиться, что все они кратны одному и тому же числу, которое и равно, очевидно, заряду электрона.

Для измерения заряда капель можно исследовать их движение в вертикальном электрическом поле плоского конденсатора.

Движение заряженной капли в электрическом поле зависит как от электрических сил, так и от веса капли. Вес капли может быть определён по скорости её падения в отсутствие поля.

Рассмотрим свободное падение капли. Уравнение её движения при падении имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = P - F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где P - вес капли, v - её скорость, а $F_{\text{тр}}$ - сила трения капли о воздух. Сила трения сферической капли определяется формулой Стокса:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v = k v, \quad (3)$$

где r - радиус капли, η - коэффициент внутреннего трения воздуха, $k = 6\pi\eta r$.

Подставляя (3) в (2), найдём

$$m \frac{dv}{dt} = mg - k v. \quad (4)$$

Как нетрудно убедиться, решение этого уравнения имеет вид

$$v = \frac{mg}{k} (1 - e^{kt/m}) \quad (5)$$

Установившееся значение скорости равно

$$v_{\text{уст}} = \frac{mg}{k} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9} \frac{\rho}{\eta} g r^2, \quad (6)$$

здесь ρ - плотность масла. Заметим, что (6) может быть немедленно получено из (4), если положить $dv/dt = 0$.

Как следует из (5), установление скорости происходит с постоянной времени

$$\tau = \frac{m}{k} = \frac{2}{9} \frac{\rho}{\eta} r^2. \quad (7)$$

Время установления скорости, таким образом, быстро падает с уменьшением радиуса капли r . Для мелких капель оно столь мало, что движение капли всегда можно считать равномерным. Выражение (6) в этом случае определяет радиус капли через скорость её падения. Обозначая через h путь, пройденный каплей за время t_0 , найдём

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2\rho g t_0}}. \quad (8)$$

Рассмотрим теперь движение капли в присутствии электрического поля. Напряжённость поля E в конденсаторе равна

$$E = \frac{V}{l}, \quad (9)$$

где l - расстояние между пластинами, а V - разность потенциалов между ними, измеряемая с помощью вольтметра.

Нас будет интересовать случай, когда поле заставляет каплю подниматься. Уравнение движения при этом имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{qV}{l} - mg - kv, \quad (10)$$

где q - заряд капли. Прибавление постоянного члена не изменяет постоянной времени τ , с короткой устанавливается скорость капли. Для определения установившейся скорости мы можем снова положить левую часть (10) равной нулю.

Измерим время t подъёма капли на начальную высоту. Используя равенства (4), (8) и (10), найдём, что заряд капли равен

$$q = 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 h^3}{g\rho}} \cdot \frac{l(t_0 + t)}{V t_0^{3/2} t}. \quad (11)$$

2 Экспериментальная установка.

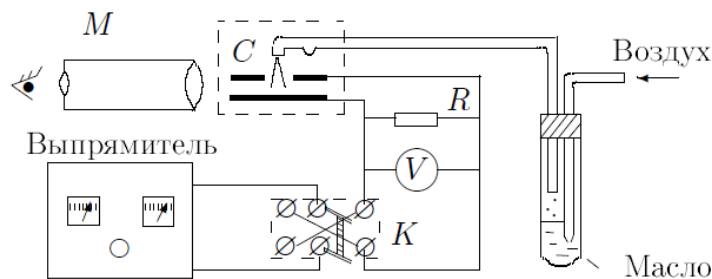


Рис. 1: Схема экспериментальной установки для измерения заряда электрона.

Схема установки представлена на рис. 2. Масло разбрызгивается пульверизатором. капли масла попадают в конденсатор C через небольшое отверстие в верхней пластине. При этом часть из них вследствие трения о воздух приобретает случайный по абсолютной величине и знаку электрический заряд.

Напряжение на пластины подаётся с регулируемого выпрямителя и измеряется вольтметром V . Ключ позволяет менять направление поля в конденсаторе, чтобы можно было работать как с отрицательно, так и с положительно заряженными каплями. При размыкании ключа конденсатор разряжается через дополнительное сопротивление $R \approx 10 \text{ МОм}$.

Время отсчитывается по секундомеру.

Естественно, что слабые электрические силы, действующие на каплю, несущую всего один или несколько электронных зарядов, способны существенно изменить её движение в том случае, если сама она очень мала. Опыт производится поэтому с мелкими каплями, наблюдение за которыми возможно только с помощью микроскопа.

В фокальной плоскости окуляра измерительного микроскопа виден ряд горизонтальных линий, расстояние между которыми было предварительно определено с помощью объектного микрометра. Наблюдая за перемещением капли между нитями, нетрудно определить путь, пройденный каплей. Время t_0 свободного падения капли от одной выбранной линии до другой и время t её обратного подъёма, происходящего под действием сил электрического поля, измеряется секундомером.

Из постановки опыта очевидно, что дискретность заряда может быть обнаружена лишь в том случае, если ошибка δq в измерении заряда капли существенно меньше абсолютной величины заряда электрона e . Допустимая относительная ошибка опыта $\delta q/q$ должна быть поэтому много меньше $e/q = 1/n$, где n - заряд капли, выраженный в числе зарядов электрона. Этому условию тем легче удовлетворить, чем меньше число n . В нашем случае трудно определить q с точностью лучше 5%. Заряд капли должен поэтому быть существенно меньше 20 зарядов электрона - лучше всего, если он не превосходит пяти электронных зарядов.

3 Обработка результатов.

Проведём серию измерений для 7 капель, а именно: измерим время их падения под действием силы тяжести на расстояние $h = 1$ мм и время их подъёма под действием электрических сил также на расстояние $h = 1$ мм.

Запишем полученные данные в таблицу 1. Для всех капель рассчитаем значения q , а также σ_q по формуле:

$$\sigma_q = q \sqrt{\frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_t^2 t_0^2}{t^2 (t_0 + t)^2} + \frac{\sigma_{t_0}^2}{4t_0^2} \left(\frac{3t + t_0}{t + t_0} \right)^2},$$

где $\sigma_V = 10$ В, $\sigma_t = \sigma_{t_0} \simeq 0.2$ с.

Таблица 1: Полученные данные.

Капля №	1					2					3				
V, В	1000					970					800				
t_0 , сек	21.9	22.3	23.7	21.7	22.4	21.3	21.5	21.3	21.2	20.5	21.8	20.5	20.4	20.9	20.7
t , сек	34.7	33.7	38.7	35.7	35.1	42.2	41.4	40.3	40.7	40.7	74.2	72.3	77.1	74.4	75.2
$q \cdot 10^{-19}$, Кл	1.22	1.21	1.07	1.22	1.18	1.21	1.20	1.23	1.23	1.28	1.22	1.32	1.31	1.28	1.29
$\sigma_q \cdot 10^{-19}$, Кл	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Капля №	4					5					6				
V, В	980					1000					860				
t_0 , сек	18.4	18.5	17.8	18.4	18.3	16.5	16.1	15.8	15.4	16.3	9.2	9.2	9	9.4	9.3
t , сек	68.3	66.1	69.8	68.2	71.7	14.4	15.0	15.4	14.9	15.6	66.2	71.4	72.4	75.6	76.2
$q \cdot 10^{-19}$, Кл	1.25	1.25	1.30	1.26	1.25	2.45	2.45	2.47	2.57	2.38	3.63	3.60	3.70	3.47	3.52
$\sigma_q \cdot 10^{-19}$, Кл	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12

Капля №	7				
V, В	1000				
t_0 , сек	10.3	10.3	10.1	10.2	10.2
t , сек	20.4	20.4	20.1	20.9	20.5
$q \cdot 10^{-19}$, Кл	3.48	3.48	3.58	3.49	3.52
$\sigma_q \cdot 10^{-19}$, Кл	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09

Усредним значения q для каждой капли, занесём данные в таблицу 2.

Таблица 2: Средние значения заряда капли.

Капля №	1	2	3	4	5	6	7
$q_{\text{ср}} \cdot 10^{-19}$, Кл	1.18	1.23	1.28	1.26	2.46	3.58	3.51
$\sigma_q \cdot 10^{-19}$, Кл	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.12	0.09
ε_q , %	2	2	2	2	2	3	3

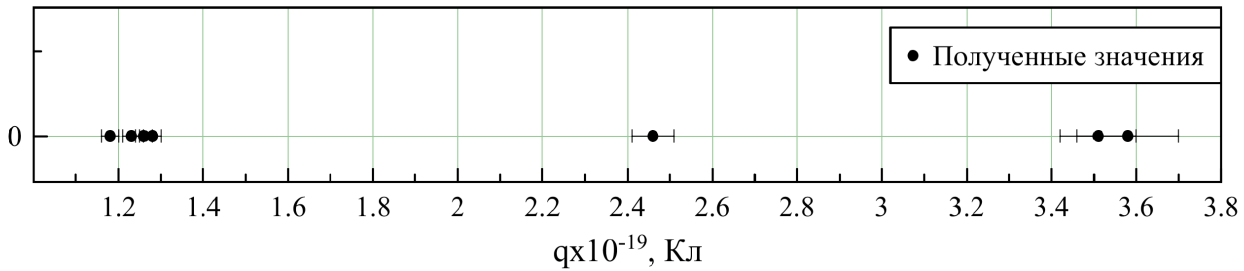


Рис. 2: Полученные значения q .

Получаем, что наибольший общий делитель для всех измеренных капель равен

$$|e| \simeq (1.25 \pm 0.12) \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \simeq (3.75 \pm 0.36) \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ } (\varepsilon \simeq 10\%)$$

"Подвесим" одну из капель в электрическом поле. Определим соответствующее напряжение, отключим его и измерим время падения капли на расстояние $h = 0.75 \text{ мм}$. Поменяв полярность напряжения, вернём каплю на прежнее место и снова подвесим её. Снова запишем напряжение. Повторим процедуру для данной капли несколько раз, запишем результаты в таблицу 3, оценим из этого опыта заряд капли по формуле (11), полагая время подъёма $t = \infty$. По разбросу результатов (ΔV и Δt) оценим точность измерения заряда этой капли.

$$(11) \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} q = 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 h^3}{gp}} \cdot \frac{l}{V t_0^{3/2}}.$$

Таблица 3: Измерение капли.

$V, \text{ В}$	680	680	680	680	680
$t_0, \text{ с}$	7.6	7.6	7.4	7.3	7.6
$q \cdot 10^{-19}, \text{ Кл}$	3.49	3.49	3.63	3.70	3.49

$$q_{\text{ср}} = (3.56 \pm 0.09) \cdot 10^{-19} \text{ Кл } (\varepsilon \simeq 3\%)$$

Оценим максимальный путь релаксации s в условиях эксперимента:

$$s = v_{\text{уст}} \tau = \frac{1}{g} \left(\frac{h}{t_0} \right)^2 = \frac{1}{9.8} \left(\frac{10^{-3}}{9} \right)^2 \simeq 1.26 \text{ нм}$$

4 Вывод.

Полученное значение элементарного заряда отличается от табличного на 30%. Причиной этому могли послужить несколько факторов:

- систематическая ошибка установки (все полученные заряды не кратны табличному значению элементарного заряда)

- ошибка наблюдателя при выборе капли (от правильности выбора капли зависит точность измерения)
- засвеченность окуляра, которая не позволила с высокой точностью определить время прохождения нужного расстояния каплей
- человеческий фактор