

3.3.3. Опыт Милликена.

Дорогинин Д.В.

16 октября 2019 г.

Цель работы: измерение элементарного заряда методом масляных капель.

В работе используются: плоский конденсатор в защитном кожухе, измерительный микроскоп, электростатический вольтметр, электронный секундомер, переключатель напряжений, пульверизатор с маслом.

Теория

Если элементарный заряд существует, то все заряды будут ему кратны. В опыте будут измеряться заряды капелек масла, несущих несколько элементарных зарядов.

Для измерения заряда будем исследовать движение капелек в электрическом поле. Уравнение движения капли при свободном падении

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

где m – масса капли, v – её скорость, $F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v = kv$ – сила вязкого трения, r – радиус капли, η – коэффициент вязкости воздуха. Отсюда получаем

$$v = \frac{mg}{k} (1 - e^{-kt/m}). \quad (2)$$

Скорость установится на

$$v_{\text{уст}} = \frac{mg}{k} = \frac{2\rho}{9\eta} gr^2,$$

где ρ – плотность масла. Установление этой скорости происходит с постоянной

$$\tau = \frac{m}{k} = \frac{2\rho}{9\eta} r^2$$

Обозначая h путь капли, пройденный за t_0 , получаем формулу для её радиуса:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2\rho g t_0}}. \quad (3)$$

В случае движения в электрическом поле конденсатора с разностью потенциалов V и расстоянием l между пластинами получаем уравнение движения

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{qV}{l} - mg - kv, \quad (4)$$

Новое слагаемое не влияет на τ , новая установившаяся скорость

$$v'_{\text{уст}} = \frac{qV/l - mg}{k}.$$

Если t – время подъёма на высоту h , то можно получить формулу заряда капли:

$$\begin{aligned} \frac{qV}{kl} - v_{\text{уст}} &= v'_{\text{уст}} = \frac{h}{t}; \\ k &= 6\pi\eta r = 6\pi\eta \sqrt{\frac{9\eta h}{2\rho g t_0}}; \\ \Rightarrow q &= 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 h^3}{g\rho}} \cdot \frac{l(t_0 + t)}{V t_0^{3/2} t} \end{aligned}$$

Описание установки

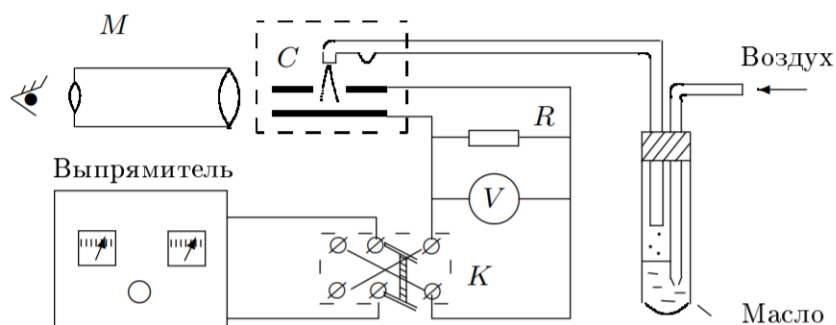


Схема представлена на рисунке. Масло разбрызгивается пульверизатором, попадает на конденсатор C через небольшое отверстие, приобретая заряд за счёт трения о воздух. Напряжение подаётся с выпрямителя и измеряется вольтметром V . Ключ K позволяет менять направление поля конденсатора. При замыкании конденсатор разряжается в $R \approx 10$ МОм.

Для наблюдения за каплями установлен микроскоп, в фокальной плоскости окуляра которого виден ряд горизонтальных линий с предварительно определённым расстоянием между ними. Время движения капель измеряется электронным секундомером.

Ход работы

1. Оценим величину напряжения V , которое нужно для подъёма капель, несущих от 1 до 5 зарядов электрона на высоту $h = 1$ мм, задав $t_0 \approx t = 20$ с:

$$V = 9\pi \sqrt{\frac{(2\eta h/t)^3}{g\rho}} \cdot \frac{l}{q} \approx 200 \div 1000 \text{ В.}$$

2. Включаем осветитель. Не включая поле, слегка надавим на грушу пульверизатора и пронаблюдаем за движением облачка масляных капель.
3. Настроим окуляр на резкое изображение делений. Затем сфокусируем на появившихся каплях.
4. В начале опыта дадим каплям без поля 5-10 секунд свободно падать, чтобы крупные успели упасть на нижнюю пластину.

Из оставшихся выберем одну и произведём с ней серию измерений, наблюдая её падение под действием силы тяжести и подъём под действием электрического поля, тем самым измерив t_0 и t 5-10 раз. Такие измерения проделаем для 15 капель, каждый раз фиксируя V и имея в виду, что заряд капли может поменяться. В опыте $h = 0.2$ мм.

$U, \text{ В}$	500	400	400	400	270	270	270	600	400	400	515	515	515
h	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	8.7	13.82	12.25	14.35	10.96	11.4	7.57	9.9	11.28	9.57	10.12	12.7	8.75
	8.3	17.84	16.97	15.72	10.87	8.88	6.91	10.65	10.25	9.82	10.47	13.18	8.42
	8.05	16.7	13.92	12.32	9.82	10.25	6.9	11.58	9.67	9.53	10.45	8.53	8.46
	8.5	15.99	13.9	8.91	10	9.98	6.33	13.15	10.35	9.93	10.7	12.44	7.95
	8.55	16.15	13.98	15.05	11.22	14.03	7.13	9.18	11.41	9.51	9.43	11.68	8.9
	8.3	14.5				9.98							
	7.95												
	8.26												
	8.33												
	8.25												
	8.22												
$t_0, \text{ с}$	8.31	15.83	14.20	13.27	10.57	10.75	6.97	10.89	10.59	9.67	10.23	11.71	8.50
2	5.5	3.01	4.18	4.4	10.14	3.41	7.25	3.5	5.45	4.53	4.31	3.43	5.25
	5.42	2.36	3.42	3.95	11.77	3.68	7.17	3.33	6	4.6	4.23	3.01	5.23
	5.69	2.56	3.66	4.03	13.256	3.38	7.31	3.48	5.74	3.88	4.03	3.13	5.3
	5.35	2.2	3.8	3.97	10.36	2.86	7.59	3.4	5.43	4.23	4.4	2.61	4.95
	5.12	2.71		3.13	11.83	3.05	8.4	3.53	4.95	4.15	4.06		4.91
	5.52			3.75		4.1							
	5.18												
	5.56												
	5.33												
	5.48												
	5.95												
$t, \text{ с}$	5.46	2.57	3.77	3.87	11.47	3.41	7.54	3.45	5.51	4.28	4.21	3.05	5.13

5. Для оценки точности «подвесим» одну каплю в поле, а затем отключим его и измерим время падения на расстояние 2-3 клеток. Оценим заряд этой капли, полагая $t = \infty$.

Полученное среднее время $t_0 = 23.8 \text{ с}$ для $U = 180 \text{ В}$, капля проходила одно h . Тогда

$$\delta q = 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 h^3}{g\rho}} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{l(t_0 + t)}{V t_0^{3/2} t} = 2 \cdot 10^{-22} \text{ Кл}$$

Это демонстрирует низкую погрешность метода измерения.

Обработка данных

1. Для всех капель рассчитаем значения q . Нанесём их на числовую прямую, домножив на 10^{19} .



Как видно из распределения, большинство зарядов расположились в диапазоне 1.3 — 1.7. Возьмём их НОД и запишем его как итоговый элементарный заряд:

$$e = (1.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

2. Оценим время релаксации, взяв за t_0 время частицы с близким к e зарядом – $t_0 = 10.23$ с:

$$\tau = \frac{h}{gt_0} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Также оценим расстояние, которое частица пройдёт за это время:

$$s = \frac{1}{g} \left(\frac{h}{t_0} \right)^2 \approx 4 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$