

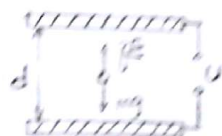
## 【实验目的】

1. 测定电子的基本电荷量  $e$  的大小
2. 验证电荷的不连续性

## 【实验原理】（电学、光学画出原理图）

### 1. 静态平衡法

利用密立根油滴仪的喷雾器将油滴喷入两块相距为  $d$  的水平放置的平行带电平板间。油滴由于喷出时的摩擦带电，设为  $q$ ，质量为  $m$ 。调节板间电压  $U$  使油滴平衡，此时有



$$mg = qE = q \frac{U}{d} \quad (1)$$

### 2. 油滴质量 $m$ 的测定

油滴在表面张力作用下，一般呈小球状。设密度为  $\rho$ ，半径为  $r$ ，则：

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad (2)$$

考虑空气对油滴的黏滞阻力  $F \propto v$ ，无电场时油滴下降一段距离有  $F$  与  $mg$  平衡。

由斯托克斯定律：

$$F = 6\pi r \eta v = mg \quad (3)$$

由 (2)(3) 有 
$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}} \quad (4)$$

而  $r \sim 10^{-6} \text{ m}$ ，斯托克斯定律修正为：

$$F = \frac{6\pi r \eta v}{1 + \frac{b}{Pr}} \quad (b = 6.17 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{cmHg}, \text{ } \rho (\text{cmHg}) \text{ 为大气压}) \quad (5)$$

则 
$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{b}{Pr}}}$$
，式中  $r$  使用 (4) 的结果即可。

还需测量  $v$ ，只要测量其下降  $l$  用时  $t$ ，计算  $v = \frac{l}{t}$  即可。

### 3. 油滴所带电荷量

综合上述各式，有 
$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t(1 + \frac{b}{Pr})} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{U} \quad (6)$$

观察发现，都有  $q = ne$  ( $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ )， $e$  是一个不变的值。

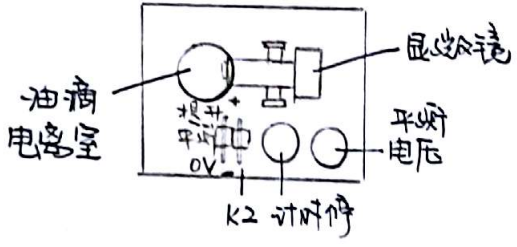
## 【实验内容】（重点说明）

1. 调节仪器, 使测量室水平, 重力场与电场平行。
2. 练习油滴的选择与控制
  - (1) 选择中等大小的油滴。油滴太大, 则降落速度太快; 油滴太小, 则自由降落速度涨落很大, 均不易测准时间。
  - (2) 练习控制油滴。
3. 数据测量与获取
  - (1) 将  $K_2$  开关拨到“平衡”挡, 调节“平衡电压”旋钮使带电油滴在屏上某点静止。记录屏幕显示的平衡电压大小。
  - (2) 将  $K_2$  开关拨到“提升”挡, 将带电油滴移至观察屏最上端水平线位置。
  - (3) 将  $K_2$  开关拨到“0V”挡, 选择带电油滴匀速下降的一段进行计时, 记录计时器读数  $t$  与下降距离  $l$ 。
  - (4) 多次测量, 填表。
4. “逐次相减法”求基本电荷量
 

利用上面测量得到的油滴的电荷量计算基本电荷量, 并验证不同油滴所带电荷量都是某一公约数的倍数。

## 【实验器材及注意事项】

实验装置主要是密立根油滴仪与显示器。



	+110V
	00.003

显示器

### 注意事项:

- ① 喷雾器中油的液面不可高于喷管上口;
- ② 喷雾器中有剩余油时须立置, 以防油流出;
- ③ 喷油时喷头不要伸入喷孔, 防止大颗粒油滴堵塞落油孔;
- ④ 每次实验完毕应及时擦净极板和油雾室的积油。

【数据处理】

根据【实验原理】中的推导，我们有

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

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \cdot \left[ \frac{\eta l}{t(1 + \frac{b}{pr})} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{U} \quad (8)$$

其中， $\rho = 981\text{kg/m}^3$ ,  $g = 9.79\text{m/s}^2$ ,  $\eta = 1.83 \times 10^{-3}\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ ,  $l = 1.5 \times 10^{-3}\text{m}$ ,  
 $b = 6.17 \times 10^{-6}\text{m}\cdot\text{cmHg}$ ,  $p = 76.0\text{cmHg}$ ,  $d = 5.00 \times 10^{-3}\text{m}$ 。

下面是我做的 9 组实验所得的数据及根据式 (8) 计算出的  $q$  值：

表 1 - 根据  $U$  和  $t$  求  $q$  值

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U/V$	70	92	129	72	93	26	34	33	55
$t/s$	16.77	15.71	5.04	23.49	9.48	27.15	8.41	8.48	15.55
$q/10^{-19}C$	16.8	14.2	59.0	9.68	38.0	21.3	110	130	24.1

由于这些  $q$  值有些过大，我使用了同组同学的部分数据作逐次相减求基本电荷量。下表中， $U, t, q_i$  的含义同前。做逐次相减： $\Delta q_i = q_{i+1} - q_i$ ，注意到  $\Delta q_2$  和  $\Delta q_8$  的值较小，考虑到误差因素，我们将  $q_2, q_3$  和  $q_8, q_9$  的值分别取平均，得到新的  $q'_j$  一列，对该列做逐次相减，得到最右边的  $\Delta q'_j$  一列：

表 2 - 逐次相减求基本电荷量

	$U/V$	$t/s$	$q_i/10^{-19}C$	$\Delta q_i/10^{-19}C$	$q'_j/10^{-19}C$	$\Delta q'_j/10^{-19}C$
1	62	28.39	8.33	1.35	8.33	1.51
2	72	23.49	9.68	0.32	9.84	1.46
3	18	54.95	10.0	1.30	-	-
4	16	54.67	11.3	1.20	11.3	1.20
5	14	55.75	12.5	1.70	12.5	1.70
6	92	15.71	14.2	1.20	14.2	1.20
7	13	51.33	15.4	1.40	15.4	1.70
8	70	16.77	16.8	0.60	17.1	2.60

	$U/V$	$t/s$	$q_i/10^{-19}C$	$\Delta q_i/10^{-19}C$	$q'_j/10^{-19}C$	$\Delta q'_j/10^{-19}C$
9	11	52.96	17.4	2.30	-	-
10	140	9.72	19.7	-	19.7	-

对  $\Delta q'_j$  取平均, 得到基本电荷的估计值:

$$\hat{e} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 \Delta q'_j = 1.62 \times 10^{-19} C \quad (24)$$

实际上, 这里的最后一个  $\Delta q'_j$ , 即  $\Delta q'_7 = 2.60 \times 10^{-19} C$  应当考虑是相差了 2 个基本电荷, 因为其差值与前面的  $\Delta q'_3 = 1.20 \times 10^{-19} C$  相比相差了一倍有余。这里并没有这样考虑, 是因为实验误差较大, 而我们的实验以验证为主, 我们预知  $e = 1.60 \times 10^{-19} C$  的情况下会知道这样的差别来源于一个过小的测算和一个过大的测算。

我另外尝试了将  $\Delta q'_7 = 2.60 \times 10^{-19} C$  考虑成 2 个基本电荷进行计算, 即  $\hat{e}' = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 \Delta q'_j$ , 测得结果会导致整体数据存在较大问题, 表现为  $n'_i = \frac{q_i}{\hat{e}'}$  均近似为  $k + 0.5$  的值, 会导致后续的计算无法进行。综合上述原因, 我们这里将  $\Delta q'_7$  当成一个基本电荷进行计算。

计算各个油滴的基本电荷数  $n_i = \frac{q_i}{\hat{e}}$ , 并用  $e_i = \frac{q_i}{n_i}$  求各个油滴测得的基本电荷量:

表 3 - 各油滴的基本电荷数及其测得的基本电荷量

	$q_i/10^{-19}C$	$\Delta q_i/10^{-19}C$	$n_i$ 计算值	$n_i$ 取整值	$e_i/10^{-19}C$
1	8.33	1.35	5.141975	5	1.67
2	9.68	0.32	5.975309	6	1.61
3	10.00	1.30	6.17284	6	1.67
4	11.30	1.20	6.975309	7	1.61
5	12.50	1.70	7.716049	8	1.56
6	14.20	2.40	8.765432	9	1.58
7	15.40	0.20	9.506173	10	1.54
8	16.80	0.60	10.37037	10	1.68
9	17.40	2.30	10.74074	11	1.58
10	19.70		12.16049	12	1.64

对  $e_i$  取平均值, 求得

$$\bar{e} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} e_i = 1.61 \times 10^{-19} C \quad (25)$$

根据  $e_i$  计算不确定度

$$u_e = \sqrt{\frac{1}{10 \times (10 - 1)} \sum_{i=1}^{10} (e_i - \bar{e})^2} = 1.6 \times 10^{-20} C \quad (26)$$

因此  $e$  的计算结果

$$e = (1.61 \pm 0.16) \times 10^{-19} C \quad (27)$$

与公认值  $e_0 = 1.60 \times 10^{-19} C$  比较, 误差

$$E = \frac{|e - e_0|}{e_0} = 0.7\% \quad (28)$$

### 【实验结果】

就实验目的 (1), 我们测定了  $e$  的大小。虽然测定值与公认值只有 0.7% 的误差, 但是不确定度达到了测定值的 10%, 这说明我们实验结果的可信性较弱。【误差分析】节已经给出了对该问题的分析。总体而言, 我们完成了实验目的 (1)。

就实验目的 (2), 我们观察表 3 可以看出, 除  $n_7$  由于误差原因偏差较大以外, 其他  $n_i$  的值均与取整倍比较接近, 这相较随机的 10 个值来讲具有较明显的离散性。考虑实验的误差, 我们认为不同油滴所带电量均为公约数  $e$  的倍数, 这验证了电荷的不连续性。

## 【误差分析】

1. 最大的误差来源应是下落时间  $t$  的测定。

① 较大的油滴体积太大，下落时间短，不易测量；

② 较小的油滴容易产生漂移，增大测量误差；

③ 人眼判断油滴是否到达预定位置以及按下计时按钮均会有一定偏差。

2. 在调节电压使油滴平衡的过程中，仅借助人眼观察较难判断油滴是否处于静止平衡状态，这会给  $U$  的测量带来误差。我在实验中的解决方案是将油滴移动到一条水平格线上调节平衡以参照；但用此法可以发现很难调节油滴平衡，且伴有上下抖动，推测可能电压不稳。

## 【实验心得及思考题】

思考题 1. 油滴下落过程中，有

$$ma = mg - 6\pi r\eta v$$

$$\text{即 } a = g - \frac{6\pi r\eta}{m} v$$

$$\text{此处令 } k = \frac{6\pi r\eta}{m} \quad (\text{单位 } s^{-1})$$

$$\text{则有 } a = g - kv$$

$$\text{可知最大速度 } v_m = \frac{g}{k}$$

$$\text{由 } \textcircled{3} \text{ 式有 } \frac{dv}{g - kv} = dt$$

$$\text{两边积分得 } -\frac{1}{k} \ln(g - kv) = t$$

$$\text{即 } v = \frac{g}{k} - \frac{1}{k} e^{-kt}$$

$$\text{又由 } \textcircled{3} \text{ 式有 } \frac{dv}{dx} = g - k \frac{dx}{dx}$$

$$\text{即 } dv = g dt - k dx :$$

$$\text{两边积分得 } v_m = gt - kl$$

此处  $t$  为实际下落时间， $l$  为下落距离。

如果忽略加速过程，则时间

$$t' = \frac{l}{v_m} = \frac{lk}{g} \quad \textcircled{2}$$

与  $\textcircled{3}$  式对比，有误差

$$\Delta t = t - t' = \frac{1}{k} = \frac{m}{6\pi r\eta} = \frac{2r^2\rho}{3\eta} \quad \textcircled{3}$$

$$\text{估算有 } r = 6 \times 10^{-7} \text{ m}, \rho = 981 \text{ kg/m}^3, \\ \eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}. \text{ 代入 } \textcircled{3} \text{ 式有}$$

$$\Delta t = 1.3 \times 10^{-5} \text{ s} \quad \textcircled{4}$$

⑩ 这远小于实验中测得的时间  $t$ ，即  $\Delta t$  带来的误差在  $t$  的有效位数之后，对实验结果无影响。

⑪ ⑫ ⑬ 思考题 2. 选择中间的 6 格较合适。更高和更低的地方太靠近极板，电场的方向和大小可能不同于预期；如果选择的格数太少，则时间较短，计时误差大。

⑭ ⑮ ⑯ 思考题 3. 油滴变模糊说明油滴发生了水平移动，与显微镜的水平距离发生了改变。可能是因为极板不水平导致电场方向不竖直，或是油滴较小发生了漂移。为避免测量中丢失油滴，应保证极板水平，并选择合适大小的油滴。

⑰ 实验心得. 本次实验后我基本掌握了密立根油滴实验的原理和思路，但选择合适大小的油滴的能力还有待提高。