

# 实验名称 密立根油滴实验

姓名: 刘子高 学号: 20002462 实验班: G13 组号: 15 教师: 倪一

## 一、实验目的

1. 学习密立根油滴实验的设计思想;
2. 验证电荷的不连续性;
3. 学会利用平衡法与动态法两种方法测量油滴的电荷量, 并测定基本电荷值  $e$ ;
4. 培养严谨的科学实验态度。

## 二、实验原理

1. 测量微观电荷量  $q$  ( $q < 10e$ ) 的思路:

- (1) 研究对象: 带电油滴;
- (2) 间接测量量: 油滴电荷量  $q$ , 基本电荷量  $e$ ;
- (3) 思路: 转化测量法;  $\Rightarrow$  找到更容易测量的物理量, 宏观观测反映微观特性;
- (4) 实现: 用电场控制带电粒子的运动。

2. 置于电场中的油滴的三种状态:

(1) 状态一: 匀速下落

• 条件:  $U=0$ , 即无电场



$$\begin{cases} \text{浮力: } F_f = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{air}} g \\ \text{重力: } mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{oil}} g \\ \text{粘滞力: } F_r = 6\pi r \eta v_g \end{cases}$$

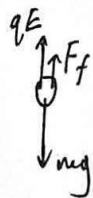
$$F_r = mg - F_f$$

$$\rightarrow r = \left( \frac{9\eta v_g}{2g\rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{9\eta L}{2g\rho t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

• 特点: 油滴大小  $r$  与速率  $v_g$ , 从而与自由下落时间  $t_g$  唯一对应;

(2) 状态二: 静态悬浮

• 条件: 有电场



$$qE = mg - F_f \xrightarrow{(1)} q = \frac{18\pi\eta^{\frac{2}{3}}}{(2g\rho)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{d}{U} \cdot \left( \frac{L}{t_g} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

• 特点: 静态悬浮状态将  $q$  关联到油滴大小  $r$  (与  $t_g$  唯一对应) 以及平衡电场  $E$  (或平衡电压  $U$ ), 其它均为常量。

• 平衡法 = 匀速下落 + 静态悬浮

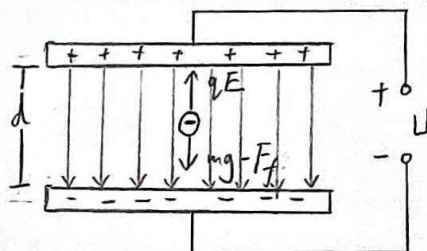
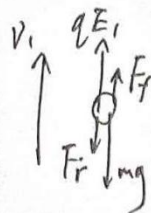


图1: 用电场控制带电油滴运动



13) 状态三: 匀速上升

条件: 有电场,  $qE_1 > mg$



$$qE_1 + F_f = mg + F_r \xrightarrow{\text{①}} q = \frac{18\pi\eta r^{\frac{3}{2}}}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_1} \cdot \left[\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_g}\right] \cdot \left(\frac{L}{t_g}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{③}$$

特点: 匀速上升状态把  $q$  关联到油滴大小  $r$  与  $t_g$  值一一对应) 以及上升电压  $U_1$  和上升时间  $t_1$ , 其它均为常量。

动态法 = 匀速下落 + 匀速上升

3. 密立根油滴实验的改进:

(1) 用油滴替代水滴

最初密立根用水滴作为电量的载体, 由于水滴的蒸发, 改用挥发性小的油滴。

(2) 对粘滞系数的修正

起先计算所得的  $e$  值随油滴的减小而增大, 密立根认为由于油滴甚小, 其直径可和空气分子的平均自由程相比拟, 所以不能再将空气看成是连续介质, 油滴所受粘滞力必将减小, 粘滞系数应予以修正。

(3) 经过粘滞系数的修正 (一级近似) 以后:

• 平衡法测得的油滴电荷量 —

$$q = \frac{18\pi\eta}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U} \cdot \left(\frac{L}{t_g}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}}\right]^{\frac{3}{2}} \quad \text{④}$$

• 动态法测得的油滴电荷量 —

$$q = \frac{18\pi\eta L}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_1} \cdot \left[\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_g}\right] \cdot \left(\frac{L}{t_g}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{b}{pr_0}}\right]^{\frac{3}{2}} \quad \text{⑤}$$

4. 基本电荷  $e$  的计算:

采用“倒证法”, 确定电荷数  $n$  和基本电子电量  $e$ , 及百分误差:

$$n_{\text{非整}} = \frac{q_i}{e_{\text{公认}}} \quad \text{⑥}$$

$$e = \frac{q_i}{n_{\text{非整}}} \quad \text{⑦}$$

$$\%e = \frac{|e - e_{\text{公认}}|}{e_{\text{公认}}} \times 100\% \quad \text{⑧}$$

由此也可验证电荷的不连续性, 和所有电荷都是基本电荷  $e$  的整数倍。

### 三. 实验仪器

密立根油滴仪、显示器、油滴管、实验总体装置。



## 四、实验内容与主要步骤

### 1. 调整仪器

- (1) 调节调平螺丝, 将平行电极板调到水平, 使平衡电场方向与重力方向平行以免引起实验误差;
- (2) 打开密立根油滴仪的开关, 打开显示器开关, 将电压档从"0"调至"十"向电压;
- (3) 调节显微镜焦点, 使油滴清晰显示在显示屏上。

### 2. 喷雾与选择油滴

- (1) 快速按压喷雾器, 通过喷雾口向油滴室内喷入油雾, 显示器视场中将出现大量清晰的油滴;
- (2) 加上约为200V的平衡电压, 改变其大小与极性, 驱散不需要的油滴, 粗测并选择2mm下落时间约为15s~25s的油滴, 确定好油滴后, 点击"确认状态";
- (3) 调节平衡电压的大小, 使油滴能够静止悬浮在视场中;

### 3. 测量油滴

- (1) 测量了滴油滴的平衡电压、下降时间、上升时间和上升电压, 同一油滴进行8次测量;
- (2) 显示屏上8格为2mm, 开始计时前, 油滴应下落一小段距离以达到匀速, 上升时同理, 由于边界外的空隙很小, 油滴可略微跑出画面;
- (3) 结束计时后, 应将油滴切换到"悬停"状态, 即调至"平衡电压", 以免丢失油滴。

### 4. 数据记录

将每个油滴的所有测量数据  $U_{平衡}$ 、 $t_g$ 、 $U_{上升}$ 、 $t_i$  均记入表格中, 根据相应的公式及原理计算油滴所带电荷量, 进而求解基本电荷量  $e$  及相对误差。

## 五、数据记录与处理

### 1. 实验中记录的3滴油滴的相关数据:

油滴1	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
$U_{平衡}$	215	215	215	215	215	215	215	215	215
$t_g$	16.18	16.38	18.96	17.53	18.38	17.81	17.10	17.48	17.478
$U_{上升}$	322	322	322	322	322	322	322	322	322
$t_i$	32.30	31.40	33.97	33.85	33.17	31.64	32.88	33.14	32.79375

油滴2	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
$U_{平衡}$	205	205	205	205	205	205	205	205	205
$t_g$	18.60	18.29	18.28	18.73	18.10	18.54	18.18	18.29	18.376
$U_{上升}$	307	307	307	307	307	307	307	307	307
$t_i$	36.42	36.29	36.36	36.54	36.14	36.32	36.03	36.32	36.3025



油滴3	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
$U_{平衡}$	207	207	207	207	207	207	207	207	207
$t_g$	18.59	18.90	18.28	17.96	18.11	17.91	18.33	18.52	18.325
$U_{上升}$	310	310	310	310	310	310	310	310	310
$t_i$	33.86	34.70	34.83	35.78	35.99	35.82	35.85	35.27	35.2625

## 2. 计算每个油滴所带的电量 $q_i$

已知参数值: 钟油密度:  $\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $20^\circ\text{C}$ ); 空气粘滞系数:  $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

重力加速度:  $g = 9.794 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; 修正系数:  $b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ N/m}$

大气压强:  $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ; 平行极板间距:  $d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

油滴运动的距离  $l = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$

### 1) 油滴1.

$$\text{平衡法: } q_1 = \frac{18\pi}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_{平衡}} \cdot \left[ \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p \cdot r_0}} \right]^{\frac{3}{2}} = 8.0843 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{动态法: } q'_1 = \frac{18\pi l}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_{上升}} \cdot \left[ \frac{1}{t_i} + \frac{1}{t_g} \right] \cdot \left[ \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p \cdot r_0}} \right]^{\frac{3}{2}} = 8.2748 \times 10^{-19} \text{ C}$$

### 12) 油滴2

$$\text{平衡法: } q_2 = \frac{18\pi}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_{平衡}} \cdot \left[ \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p \cdot r_0}} \right]^{\frac{3}{2}} = 7.8417 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{动态法: } q'_2 = \frac{18\pi l}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_{上升}} \cdot \left[ \frac{1}{t_i} + \frac{1}{t_g} \right] \cdot \left[ \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p \cdot r_0}} \right]^{\frac{3}{2}} = 7.8870 \times 10^{-19} \text{ C}$$

### 13) 油滴3

$$\text{平衡法: } q_3 = \frac{18\pi}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_{平衡}} \cdot \left[ \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p \cdot r_0}} \right]^{\frac{3}{2}} = 7.7998 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{动态法: } q'_3 = \frac{18\pi l}{(2g\rho)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{d}{U_{上升}} \cdot \left[ \frac{1}{t_i} + \frac{1}{t_g} \right] \cdot \left[ \frac{l}{t_g} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{\eta}{1 + \frac{b}{p \cdot r_0}} \right]^{\frac{3}{2}} = 7.9149 \times 10^{-19} \text{ C}$$

## 3. 利用“倒证法”计算基本电荷电量 $e$ 及其误差 $E$

### 1) 油滴1

$$\text{平衡法 } n_1 = \frac{q_1}{e_{AK}} = \frac{8.0843 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 5.0, \quad e_1 = \frac{q_1}{\ln[n_1]} = 1.617 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_1 = \frac{|e_1 - e_{AK}|}{e_{AK}} \times 100\% = \frac{|1.617 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} \times 100\% = 0.93\%$$

$$\text{动态法 } n'_1 = \frac{q'_1}{e_{AK}} = \frac{8.2748 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 5.2, \quad e'_1 = \frac{q'_1}{\ln[n'_1]} = 1.655 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E'_1 = \frac{|e'_1 - e_{AK}|}{e_{AK}} \times 100\% = \frac{|1.655 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} \times 100\% = 3\%$$



### (2) 油滴 2

$$\text{平衡法 } n_2 = \frac{q_2}{e_{\text{油}}} = \frac{7.8417 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.9, \quad e_2 = \frac{q_2}{\ln t[n_2]} = 1.568 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_2 = \frac{|e_2 - e_{\text{油}}|}{e_{\text{油}}} \times 100\% = \frac{|1.568 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} \times 100\% = 2\%$$

$$\text{动态法 } n_2' = \frac{q_2'}{e_{\text{油}}} = \frac{7.8870 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.9, \quad e_2' = \frac{q_2'}{\ln t[n_2']} = 1.577 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_2' = \frac{|e_2' - e_{\text{油}}|}{e_{\text{油}}} \times 100\% = \frac{|1.577 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} \times 100\% = 2\%$$

### (3) 油滴 3

$$\text{平衡法 } n_3 = \frac{q_3}{e_{\text{油}}} = \frac{7.7998 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.9, \quad e_3 = \frac{q_3}{\ln t[n_3]} = 1.560 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_3 = \frac{|e_3 - e_{\text{油}}|}{e_{\text{油}}} \times 100\% = \frac{|1.560 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} \times 100\% = 3\%$$

$$\text{动态法 } n_3' = \frac{q_3'}{e_{\text{油}}} = \frac{7.9149 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.9, \quad e_3' = \frac{q_3'}{\ln t[n_3']} = 1.583 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_3' = \frac{|e_3' - e_{\text{油}}|}{e_{\text{油}}} \times 100\% = \frac{|1.583 \times 10^{-19} - 1.602 \times 10^{-19}|}{1.602 \times 10^{-19}} \times 100\% = 1\%$$

## 六、实验结果与分析

1. 基本了解和学习了密立根油滴实验的设计思想后, 分别利用平衡法、动态法两种方法测量油滴的电荷量, 进一步计算基本电荷量  $e$  的值, 并计算其相对误差, 均在 5% 以内, 所以测定的基本电荷量有一定的准确性, 实验结果较为准确。
2. 由实验过程与结果, 验证了电荷的不连续性, 以及所有电荷都是基本电荷  $e$  的整数倍。
3. 实验中应当注意: 同一颗油滴反复多次测量时, 不要丢失油滴。

## 七、分析讨论题

1. 本实验的巧妙构思在哪里?

答: 本实验的巧妙构思在于, 利用宏观量 ( $U, t_g, U, t_f$ ) 的测量来反映微观量 ( $q, e$ ), 即转化测量法来间接测量油滴电荷和基本电荷量。

2. 实验中如何保证油滴做匀速运动?

答: 让油滴从开始计时线之前的一段距离释放 (由于边界外空隙较小, 油滴可略微跑出画面), 当油滴运动至开始计时线时, 再按下计时按钮开始计时, 由于有一段距离的缓冲, 此后油滴便做匀速运动了。

3. 若平行板不水平, 对测量有什么影响?

答: 如果平行板不水平, 油滴受到的重力和静电力就不在一条直线上了, 在建立受力平衡方程时还需要再乘上夹角的余弦值, 这就使原本的测量结果不准确了; 且油滴可能会在平行于板板的方向运动, 导致油滴运动轨迹为斜线。

4. 如何选择合适的油滴进行测量?

答: 调节平衡电压约为  $200\text{ V}$ , 粗选并选择  $2\text{ mm}$  内下落时间约为  $20 \sim 35\text{ s}$  的油滴, 再通过调节电压的极性和大小来驱散其它的油滴, 来保证我们的显示屏上仅剩选中的那一颗油滴。

5. 怎样判断油滴所带电荷量的改变?

答: 通过反复测量油滴经过一段距离 (如  $2\text{ mm}$ ) 所用的时间, 进行对比, 如果所用的时间有明显的改变 (即明显地超过时间测量上的随机误差), 则说明油滴所带的电荷量发生了改变。