

## 实验 35 密立根油滴实验——电子电荷的测定

美国著名物理学家密立根首先设计并完成了密立根油滴实验，该实验证明了所有电荷都是基本电荷  $e$  的整数倍，明确了电荷的不连续性，并精确测定了基本电荷  $e$  的准确数值 ( $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ )。

密立根油滴实验有其巧妙的设想、精确的构思、恰当的实验条件和方法，可得到精确和稳定的实验结果。它历来都是一个著名而有启发性的物理实验。

### 【预习提要】

- (1) 密立根油滴实验原理。
- (2) 选择油滴是做好本实验的重要因素之一。在本实验中，你依据哪些条件选择油滴的大小以保证实验的顺利进行？
- (3) 为了确保对同一油滴的重复测量，防止油滴失踪，操作上应注意什么问题？
- (4) 如果油滴仪不水平，对实验有何影响？
- (5) 本实验如何处理数据？
- (6) 了解 CCD 器件在实验中的作用。

### 【实验要求】

- (1) 通过对带电油滴在重力场和静电场中运动的观测，验证电荷的不连续性。
- (2) 学习该实验的物理构思和仪器设计技巧。

### 【实验目的】

测定油滴的带电量，并推出电子电荷的量值。

### 【实验器件】

油滴仪，CCD 器件，显示屏，秒表，喷雾器。

### 【实验原理】

当油滴从喷雾器的喷嘴喷出时，极小的油滴由于摩擦均已带电。设油滴质量为  $m$ ，所带电量为  $q$ ，两极板间电压为  $U$ ，距离为  $d$ ，如图 4-35-1 所示，则油滴在平行极板间受重力  $mg$  和静电力  $q\frac{U}{d}$  作用。若适当选择电压极性并调节电压  $U$  的大小，可使二力平衡，即

$$mg = q\frac{U}{d} \quad (4-35-1)$$

由于  $U$ 、 $d$ 、 $g$  均为已知量，只需测出油滴质量  $m$ ，便可求出所带电荷  $q$ 。由于  $m$  不能直接进行测量，故采用如下特殊方法来间接测定。

平行极板不加电压  $U$  时，油滴受重力而加速下落，但空气粘滞所引起的阻力与速度成正比，经过一小段距离到达某一速度  $v$  后，重力与阻力平衡，油滴将匀速下落。由斯托克斯定律知

$$f_r = 6\pi\eta av = mg \quad (4-35-2)$$

式中， $\eta$  为空气的粘度系数； $a$  为油滴半径（由于表面张力的原因，油滴一般为小球形）。设油的密度为  $\rho$ ，其质量  $m$  可表示为

$$m = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho \quad (4-35-3)$$

合并式 (4-35-2)、式 (4-35-3)，得油滴半径为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}} \quad (4-35-4)$$

对于半径小到  $10^{-6}\text{m}$  的小球，油滴半径接近于空气中气隙的大小，空气介质不能再认为是均匀、连续的，对斯氏定律予以修正， $\eta$  修正为  $\eta'$ ，即

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (4-35-5)$$

式中，常量  $b = 6.17 \times 10^{-6} \text{m}\cdot\text{cmHg}$ ； $p$  为大气压强，单位为  $\text{cmHg}$ ； $a$  的单位为  $\text{m}$ 。

对于油滴匀速下降速度  $v$ ，可用以下方法测出。当极板间电压  $U = 0$  时，设油滴匀速下降的距离为  $l$ ，时间为  $t$ ，则

$$v = \frac{l}{t} \quad (4-35-6)$$

综上各式，则油滴所带电量  $q$  为

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t \left( 1 + \frac{b}{pa} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (4-35-7)$$

其中

$$a = \sqrt{\frac{9\eta l}{2\rho g t}} \quad (4-35-8)$$

由于  $\rho$ 、 $g$ 、 $d$ 、 $l$ 、 $p$  和  $b$  均为与实验仪器和实验条件有关的常量，故与油滴电量  $q$  相对应

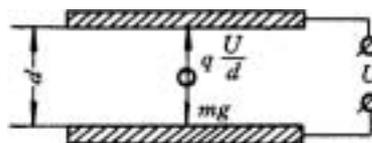


图 4-35-1 两平行板间的带电油滴

的变量只有平衡电压  $U$ 、匀速下落距离  $l$  和所用时间  $t$ 。因此，欲测定某一油滴的带电量  $q$ ，只需测  $U$ 、 $l$  和  $t$  即可。

实验发现，对同一个油滴，当改变其所带电量时，其平衡电压必须是某些特定的值  $U_n$ ，研究这些电压变化的规律，可以发现，它们都满足下列方程

$$q = ne = mg \frac{d}{U_n}$$

式中， $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ，而  $e$  则是一个不变的值。

对于不同的油滴，可以发现同样的规律，而且  $e$  值是共同的常量，这就证明了电荷的不连续性，并存在最小的电荷单位，即电子的电荷值  $e$ 。于是式 (4-35-7) 可写为

$$q = ne = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t \left( 1 + \frac{b}{pa} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U_n} \quad (4-35-9)$$

上式是本实验的理论公式。

## 【实验内容】

### 1. 仪器调节

(1) 调节仪器水平：调节油滴仪底座下的 3 个螺钉，使水准仪气泡处于中央，这时两极板处于水平位置。

(2) 显微镜调节：

①将“平衡电压”、“升降电压”两开关均置于“0”位。

②接通电源，使其预热 10 分钟，两极板上暂不接高压。

③将调焦针插入极板上的小孔中，首先调节显微镜目镜，看清分划板上的标尺；然后转动调焦手轮，使调焦针清晰。调好后抽出调焦针，若无调焦针，后一步骤可通过直接观察油滴清晰度来实现。

### 2. 测量练习

(1) 练习控制油滴：用喷雾器将油滴从喷雾口喷入（喷一下即可），微调调焦手轮，即可看见大量的小油滴从上极板落下。给平行极板加上约 300V 左右的工作电压（“+”或“-”均可），可见到多数油滴很快升降而消失。选择一个因加平衡电压而运动缓慢的油滴，仔细调节工作电压使它平衡，利用升降电压使它上升，然后将升降电压和工作电压都去掉，让它自由降落。如此反复升降，并在发现油滴变模糊时微调显微镜使之清晰，当遇到油滴突然湮没时，也可通过显微镜调焦将其重新出现。如此多次练习，掌握控制油滴的方法。

(2) 练习选择油滴：选择一个大小适当，带电量适中的油滴是本实验的关键一环。油滴太大，自由降落太快，测量时误差大，而且需带电较多才易平衡，使结果不易测准；油滴太小，又会因热扰动和布朗运动使测量时涨落太大，不易测准。选择油滴时，可根据所加工作电压的大小（约 300V 左右）和油滴匀速下降 4 个小格所用时间（约为 10~30s）来

判断油滴的大小和所带电量的多少，以选定有用的待测油滴。通常选择平衡电压为 200~300V，匀速下降 4 小格的时间在 20s 左右的油滴最适宜。

(3) 练习测试速度：任意选择几个速度快慢不同的油滴，测出它们下降 4 小格所用时间。反复练习，掌握测量油滴运动时间的方法。

### 3. 正式测量

(1) 选择一个在 300V 左右的工作电压下缓慢运动的油滴，仔细调节工作电压  $U_n$ ，使它静止，应将油滴悬于分划板某条横线附近，以便准确判断该油滴是否静止。然后记录平衡电压  $U_n$  值。

(2) 给极板加上升降电压（此时  $U_n$  保持不变），使油滴上升到最上面的刻度线上，将“工作电压”和“升降电压”开关均置“0”位，此时油滴开始下落，待其下落一小格后，开始计时，记录油滴运动 4 小格所用时间  $t$ 。停止计时时，应马上加上“工作电压”，使其静止，以便重复测量。

(3) 对一个小油滴反复测量 5 次，并测 5~10 个油滴，记录相应的  $U_n$  和  $t$ 。

### 【数据处理】

(1) 将  $U_n$  和  $t$  代入式 (4-35-9)，计算出各油滴所带电量  $q$ 。

(2) 用标准电子电荷  $e_0$  去除各个  $q_i$ ，并取整，即  $n_i = \left[ \frac{q_i}{e_0} \right]$ ，然后计算  $e_i = \frac{q_i}{n_i}$ ，最后

求出  $\bar{e} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e_i$ ，并求出相对误差  $E = \frac{|\bar{e} - e_0|}{e_0} \times 100\%$ 。

### 【注意事项】

- (1) 在实验中，要注意跟踪、控制油滴，以免丢失。
- (2) 为使平衡电压测值准确，应适当延长观察平衡状态时间。
- (3) 不断校准工作电压，若发现平衡电压有明显改变，则应放弃，重新选择油滴。

### 【思考题】

- (1) 当平衡电压开关置“+”使油滴平衡时，回答：
  - ①为什么该油滴带正电？
  - ②要使油滴向上升（在显微镜中观察到的），则“升降电压”开关置于什么位置？
- (2) 一个油滴下落极快，说明了什么？若平衡电压太小，又说明了什么？

(3) 为了减小测量误差, 希望油滴不要下落太快, 那么是否越慢越好? 为什么?

(4) 本实验如何证明电荷的不连续性?

### 【附录 1 MOD-5 型密立根油滴仪】

如图 4-35-2 所示, 油滴仪由油滴盒、油滴照明装置、调平系统、测量显微镜及供电电源等部分组成。

油滴盒(1-1)是由两块经过精磨的平行极板(上、下电极板)中间垫以胶木圆环组成。平行板间的距离为  $d$ 。胶木环上有进光孔和观察孔。油滴盒放在有机玻璃防风罩(1-2)中。上电极板中央有一个直径为  $0.4\text{mm}$  的小孔, 油滴从油雾室(1-3)经油雾孔落入小孔, 进入上、下电极板之间, 整套装置如图 4-35-3 所示。油滴和两个极板间由照明装置(2-1)、(2-2)、(2-3)照亮。

油滴盒可用调平螺丝(3-1)调节水平, 并由水准泡(3-2)进行检查。

油滴盒防风罩前装有测量显微镜(4-1), 通过胶木圆环上的观察孔观察平行极板间的油滴。目镜头(4-2)中装有分划板, 其垂直总刻度相当于视场中的  $3.00\text{mm}$ (每小格  $0.50\text{mm}$ ), 用以测量油滴运动的距离  $l$ 。视场所见分划板的刻度如图 4-35-4 所示。

外接计时器插座(8-1)与工作电压反向开关(5-3)联动, 可以很方便地测定油滴的运动时间。本实验室用秒表计时, 未用此插座。

电源部分提供四种电压:

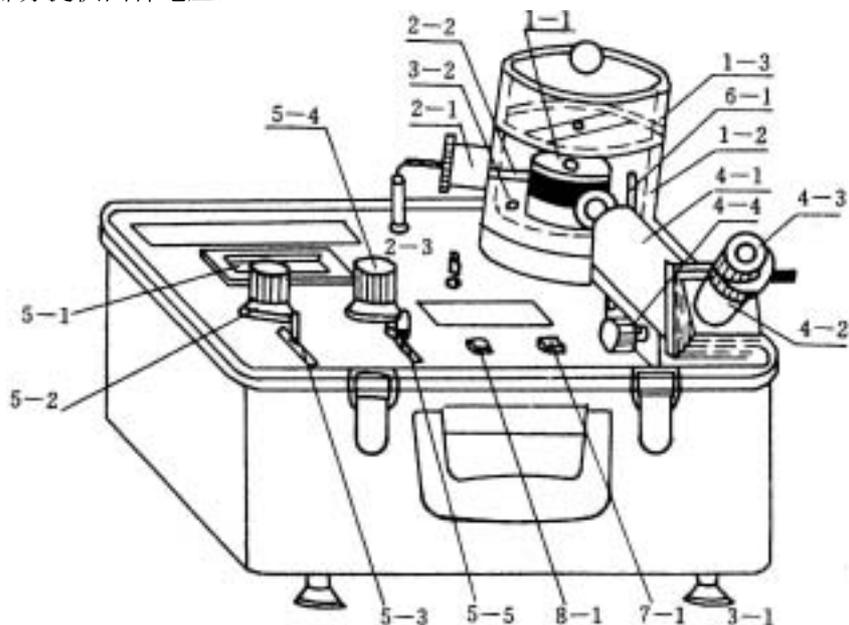


图 4-35-2 MOD-5 型油滴仪

- |           |                |              |
|-----------|----------------|--------------|
| 1—1 油滴盒   | 1—2 有机玻璃防风罩    | 1—3 有机玻璃油雾室  |
| 2—1 油滴照明灯 | 2—2 导光棒        | 2—3 照明灯电源插座  |
| 3—1 调平螺丝  | 3—2 水准泡(在防风罩内) | 4—1 测量显微镜    |
| 4—2 目镜头   | 4—3 接目镜        | 4—4 调焦手轮     |
| 5—1 数字电压表 | 5—2 工作电压调节旋钮   | 5—3 工作电压反向开关 |

- 5—4 升降电压调节旋钮 5—5 升降电压反向开关
- 6—1 低压汞灯（在 B 型、BC 型油滴仪防风罩内）
- 6—2 汞灯按钮（在显微镜右侧，图上看不见。对 5A、5AC 型油滴仪为虚设，无用）
- 7—1 CCD 电源插座
- 8—1 计时器插座

(1) 3.6V 油滴照明电压：从插座（2-3）引出。

(2) 500V 直流工作电压：该电压可以连续调节，从数字电压表（5-1）上直接读出，并由工作电压反向开关（5-3）反向，以改变上、下电极板的极性。反向开关处于“十”侧时（上电极板为负极），能达到平衡的油滴带正电；反之带负电。反向开关处在“0”位置时，上、下电极板短路，并且不带电。

(3) 200V 左右的直流升降电压：该电压可通过升降电压反向开关（5-5）叠加（加或减）在平衡电压上，以控制油滴在视场中的上、下位置。升降电压高，油滴移动速度快；反之则慢。

(4) 12VCCD 电源电压：CCD 电源插座（7-1）的中心电极为正极。

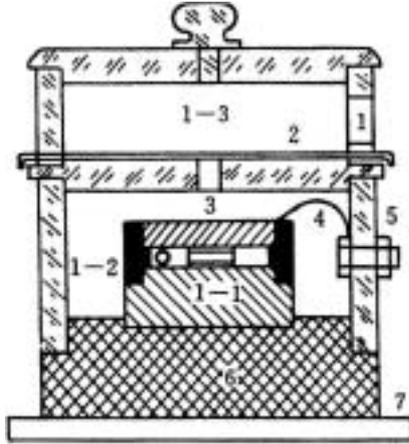


图 4-35-3 油雾室和油滴盒结构图

- 1—喷雾口 2—油雾孔开关 3—油雾孔 4—上电极板压簧
- 5—外接电源插孔 6—油滴盒基座 7—油滴仪面板

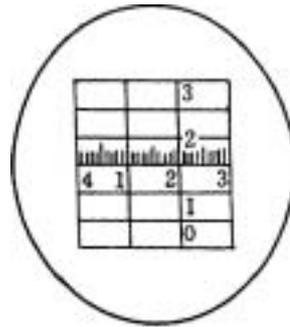


图 4-35-4 显微镜分划板图

## 【附录 2】 ICCD

### 1. CCD 的基本结构及其工作原理

CCD (Charge Coupled Devices) 电荷耦合器件是在硅片上用氧化、扩散、离子注入、光刻等集成电路工艺制成的半导体集成光电器件。其最基本的结构是由金属或低阻多晶硅膜、二氧化硅和硅组成的 MOS 电容。其基本工作原理便是在一系列 MOS 电容器的电极上，加以适当的时钟脉冲电压，使在半导体内形成能储存载流子的势阱。用光或电注入的方法，将代表信号的载流子引入势阱，再通过时钟脉冲有规则的变化，使电极下面的势阱深度作相应的变化，从而使注入势阱的载流子在半导体内作定向运动。这些载流子即代表了电信号或光信号。当载流子从器件的一端运动到另一端时，通过输出电路，将信号输出。它能

够输出与光像位置一一对应的时序列信号；能输出各个脉冲彼此独立相同的模拟信号。

## 2. CCD 的分类

CCD 可分为线型（阵）CCD 和面型（阵）CCD 两大类。线型 CCD 主要用于测试、传真、光学文字识别等方面。面型 CCD 的发展方向之一是用作录像的小型彩色摄像机。

## 3. ICCD 的应用

根据 CCD 的特点，与计算机结合可以广泛地应用于自动控制和在线自动测量，尤其适用于图像识别技术。用于摄像或像敏的 CCD 称为电荷耦合摄像器件，简称 ICCD (Iconscope CCD)，它的功能是将二维光学图像信号转变成一维图像信号输出 (Video Out)。ICCD 作为光学传感器，它取消了光学扫描系统或电子束扫描，在很大程度上降低了再生图像的失真。ICCD 的出现，更是推动了监控电视技术的发展，应用极其广泛。至今监控电视已包含了监控功能和闭路电视功能。涉及文化教育、科学研究、工业生产、工程施工、交通管理、海洋捕捞、医疗技术、遥感测量、卫星通信、安全防范等等各方面。

## 4. ICCD 在本实验中的应用

在本实验中，将 ICCD 器件固定于显微镜的目镜头上，便可以将密立根油滴清晰明亮地显示于电视屏上，便于实验及更好地进行观测，其示意图如图 4-35-5 所示。

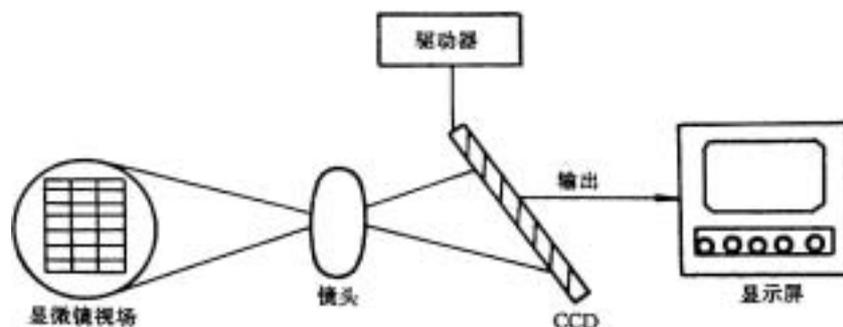


图 4-35-5 用 CCD-观察示意图