

## 实验 6.2 密立根油滴实验

美国著名实验物理学家密立根(R.A.Millikan)，在 1909 年至 1917 年期间所做的油滴实验，是近代物理学发展史上具有十分重要意义的实验：(1)它证明了电荷的不连续性，所有电荷都是基本电荷  $e$  的整倍数；(2)精确地测量了基本电荷的值为  $e=1.60\times 10^{-19}\text{ C}$ 。该实验的成功，为从实验上测定电子质量、普朗克常数等基本物理量提供了可能。由于他的杰出成就，密立根荣获了 1923 年度诺贝尔物理学奖。

密立根油滴实验设计巧妙、原理清晰、设备简单、结果精确，是著名而又有启发性的实验，堪称为物理实验的光辉典范。

### 【实验目的】

- (1) 领会密立根油滴实验的设计思想；
- (2) 测定电子电荷值，体会电荷的不连续性；
- (3) 培养学生坚忍不拔的精神和求实、科学、严谨的学习态度。

### 【实验原理】

质量  $m$ 、带电量为  $q$  的球形油滴，处在两块相距为  $d$  的水平放置的平行带电平板之间，如图 6.2.1 所示。改变两平板间电压  $U$ ，可使油滴在板间某处静止不动，此时油滴受到重力  $mg$ 、静电力  $qE$  和空气浮力的作用。若不计空气浮力，则静电力和重力平衡，即

$$mg = qE = q \frac{U}{d} \quad (6.2.1)$$

式中， $E$  为两极板间的电场强度。只要测出  $U$ 、 $d$ 、 $m$  并代入 (6.2.1) 式，即可算出油滴带电量  $q$ 。然而油滴太小(质量约为  $10^{-15}\text{ kg}$ )，其质量需用如下特殊方法测量：

由于油滴极小，在表面张力的作用下呈球形。设油滴的半径为  $r$ ，密度为  $\rho$ ，则质量为

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \quad (6.2.2)$$

两极板间未加电压时，油滴受重力作用而下落，下落过程中同时受到向上的空气粘滞阻力  $f_r$  的作用。随着下落速度的增加，粘滞阻力增大，当  $f_r = mg$  时，油滴将以某一速度  $v_0$  匀速下落。根据斯托克斯定律，有

$$f_r = 6\pi\eta r v_0 = mg \quad (6.2.3)$$

式中， $\eta$  为空气的粘滞阻尼系数， $r$  为油滴的半径， $v_0$  为油滴的下落速度。

结合式 (6.2.2)，可求得油滴的半径：

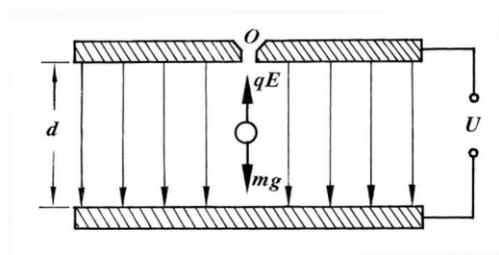


图 6.2.1 带电油滴受力图

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_0}{2\rho g}} \quad (6.2.4)$$

式中， $\rho$  为油的密度。则油滴质量为

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho \left( \frac{9\eta v_0}{2\rho g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6.2.5)$$

考虑到对如此小的油滴(直径约为 $10^{-6}$  m)来说空气已不能视为连续媒质,加上空气分子的平均自由程和大气压强 $p$ 成正比等因素,式(6.2.3)应修正如下

$$f_r = \frac{6\pi\eta r v}{1 + \frac{b}{pr}} = mg \quad (6.2.6)$$

$b$  为修正常数,  $p$  为大气压强。则式(6.2.5)应修正为

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho \left[ \frac{9\eta v_0}{2\rho g(1 + b/pr)} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (6.2.7)$$

测出油滴匀速下落距离 $l$ 和所用的时间 $t$ ,利用式(6.2.7)和(6.2.1),有

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t(1 + b/pr)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{V} \quad (6.2.8)$$

上式分母仍包含 $r$ ,因其处于修正项内,不需十分精确,计算时可用 $r = \sqrt{\frac{9\eta l}{2\rho g t}}$ 代入。又

$\eta$ 、 $l$ 、 $\rho$ 、 $g$ 、 $d$ 均为与实验条件、仪器有关的参数: $\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $g = 9.794 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $l = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $b = 8.226 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$ ,  $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。将以上数据代入式(6.2.8)得

$$q = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[ t(1 + 0.0200\sqrt{t}) \right]^{\frac{3}{2}} U} \quad (6.2.9)$$

为了证明电荷的不连续性和所有电荷都是基本电荷 $e$ 的整数倍,并得到基本电荷 $e$ ,理论上我们应对实验测得的各个油滴所带电荷 $q_i$ 求最大公约数,这个最大公约数就是基本电荷 $e$ 值。但由于实验时总是存在各种误差因素,求出各 $q_i$ 值的最大公约数比较困难,通常用“倒过来验证”的方法进行数据处理。即,将实验测量的电荷值 $q_i$ 除以公认的电子电荷值 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,得到一个接近于某一整数的数值 $n'_i = q_i / e$ ,在误差允许范围内,这一数值的整数部分 $n_i$ 即为油滴所带的基本电荷数,再用这一 $n_i$ 去除实验测量的各个电荷 $q_i$ ,即得电子电荷值 $e_i = q_i / n_i$ 。这种数据处理方法只能作为一种实验验证,且只能在油滴带电量较少(少数几个电子)时可以采用。

## 【实验仪器】

MOD-5 密立根油滴仪，喷雾器，实验用油等。

MOD-5 型油滴仪的基本结构如图 6.2.2 所示，主要由油滴盒、照明装置、调平系统、测量显微镜、计时器、供电电源、喷雾器、CCD 图像监视系统等组成。

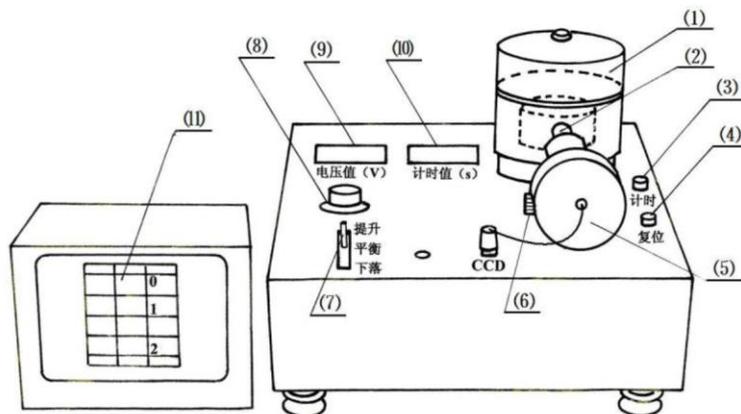


图 6.2.2 油滴仪结构示意图

(1)-油滴盒; (2)-显微镜镜头; (3)-计时按钮; (4)-计时器复位按钮; (5)-CCD 探头; (6)-测量显微镜调焦手轮; (7)-电压选择开关; (8)-平衡电压调节旋钮; (9)-数字电压表; (10)-数字计时器; (11)-监视器

在油滴仪上，显微镜镜头(2)对准油滴盒内被发光二极管照明的油滴，通过显微镜调焦手轮(6)，调整 CCD 探头(5)的位置，可在监视器的显示屏(11)上清晰地显示出油滴的像。监视器显示屏外表面贴有一层薄膜，薄膜表面印有分划线，分划线刻度 0 ~ 2 格线间所表示的实际距离为 2mm。屏的上下还留有空间，以便油滴的像不至于跑出屏幕。

电压选择开关(7)分为三挡：置于“下落”位置时，上下电极板短路，油滴可自由下落；置于“平衡”位置时，可为极板提供使油滴静止的最高为 500V 的平衡电压，此电压由平衡电压调节旋钮(8)进行细调，并由数字电压表显示(9)，单位为 V；置于“提升”位置时，是在平衡电压上叠加一个 200V 左右的提升电压，用以将油滴向上提升，便于下次测量。

(10)为测量时间的数字计时器，由计时按钮(3)控制，(4)为计时器复位按钮。

油滴盒的剖面如图 6.2.3 所示。它固定在油滴仪面板的右上方，是油滴仪的核心部分。油滴盒是用两块经过精磨的间距为 5.00mm 的平行金属板(上电极板(4)、下电极板(6))中间垫以绝缘环(5)组成，绝缘环上有照明发光二极管进光孔、显微镜观察孔(12)。上电极板中央有一直径为 0.4mm 的小孔，供油滴落入。为了防止周围空气流动的影响，整个油滴盒装在座架(7)上的有机玻璃防风罩(3)中，上面有盖板(8)，

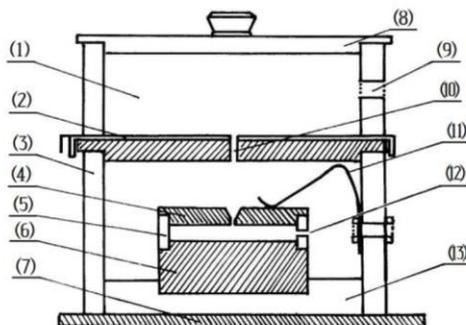


图 6.2.3 油滴盒剖面图

盖板下是油雾室(1)，上电极板与上电极压簧(11)连接，下电极板的下面为绝缘板(13)。油滴用喷雾器（此处没有画出）从喷雾口(9)喷入，并经油雾孔(10)落入油滴盒。向右推油雾孔开关(2)可关闭油雾孔，防止油滴再落入油滴盒或避免外界气流影响油滴的运动。

## 【实验内容】

### 1. 油滴仪的调整

仪器放平稳，将油滴盒调到水平状态。转动油雾室，使喷雾口朝向右前侧，打开油雾室的油雾孔开关以便喷油。打开仪器开关，预热 10min。

### 2. 油滴观察与运动控制

将电压选择置于“下落”位置，竖拿喷雾器，对准油雾室的喷雾口轻轻喷入少许油滴（喷一下即可），微调显微镜的调焦手轮，使监视器上油滴清晰。如果视场不够明亮，可调整监视器亮度。如果油滴自由下降时，在屏幕上所显示的轨迹不在竖直方向或上下颠倒，可转动 CCD 探头使油滴在屏幕上垂直下降。

将电压选择拨到“平衡”位置，在平行极板上加 250V 左右的电压，以驱走不需要的油滴，留下几颗运动缓慢的油滴，跟踪观察其中一颗的运动情况；调节电压，观察油滴运动直至其平衡不动为止；将选择开关拨到“提升”位置，把油滴提升到视场上方，然后再将选择开关置于“下落”档，油滴开始下落，并测量油滴下落一段距离所用的时间。对一颗油滴反复进行“平衡”、“提升”、“下落”、“计时”等操作，以便能熟练控制油滴。

### 3. 测量

选择平衡电压为 100~300V，匀速下落 2mm 所用时间约 20s 的油滴作为待测对象较好。油滴平衡后，记下平衡电压；将油滴提升到第一条水平刻线处开始自由下落，下落至第二条刻线时开始计时，测出油滴匀速运动 2.00mm（对应分划线四格）所用的时间  $t$ 。

对一颗油滴进行多次反复测量（一般在 5 次以上），且每次测量时均应重新调节并记录平衡电压，分别算出每次测量的结果（油滴带电量 and 基本电荷个数）。

用同样的方法至少测量 5 颗油滴，最终求出（所有）基本电荷的实验平均值。

## 【注意事项】

(1) 喷雾时切勿将喷雾器插入油雾室，甚至将油倒出来，更不应该将油雾室拿掉后直接对准上电极板中央小孔喷油，否则会将油滴盒周围搞脏，甚至把油雾孔堵塞。

(2) 选择合适的油滴是实验的关键。油滴大，质量也大，带电量也多，匀速下落一定距离的时间短，增加测量误差。而过小的油滴布朗运动明显，且不易观察。

## 【思考题】

- (1) 向油雾室喷油时为什么要使两极板短路？
- (2) 实验时如何保证测量的时间是对应油滴作匀速运动的时间？
- (3) 密立根油滴实验的设计思想、实验技巧对你的实验素质和能力的提高有何帮助？做完该实验后有何心得体会？