

密立根油滴实验

[实验目的]

1. 通过测量基本电荷电量 e 的值，验证电荷的量子性。
2. 学习用统计直方图计算基本电荷量值的方法。

[实验原理]

物质结构理论指出电荷的量值是量子化的，即不是连续的，大到宏观的物体，小到原子、原子核，它们所带的电量 Q 都只能是基本电荷 e 的整数倍。

$$Q = ke \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.3.1)$$

为了测出 e 的值，美国物理学家密立根设计了一种巧妙的方法，通过测量小油滴所带的电量来获得基本电荷的量值。油滴所带电量 Q 的测定：质量为 m 、电量为 Q 的油滴，处在如图2.3.1所示的位置，其中水平平行板之间的电压为 U ，两极板之间的距离为 d 。则油滴受重力和电场力的作用。可以通过改变电压 U 的大小使油滴处于平衡状态。这时

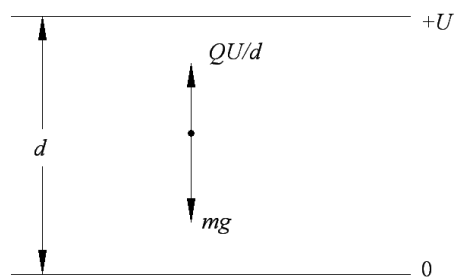


图2.3.1 油滴受力分析

$$mg = QU / d \quad (2.3.2)$$

那么只要设法测出 m 和 U ， d 为已知量，即可计算出 Q 。其中 U 可由电压表读出。

图2.3.1 油滴受力分析图

1. 油滴质量 m 的测定：当平行板间电压为零时，油滴受重力而加速下降，此时，油滴还受空气粘滞阻力 f 的作用。粘滞阻力随下降速度的增大而增大，下降一段距离后，重力与粘滞阻力达到平衡时，油滴将以 v_c 做匀速运动。由斯托克斯定律可知，在静止的连续粘滞流体中运动的刚性小球所受的阻力为：

$$f = 6\pi r\eta v_c \quad (2.3.3)$$

其中 r 为油滴半径(数量级约为 1×10^{-8} m)， η 为空气的粘度，如果忽略空气的浮力，则

$$mg = 6\pi r\eta v_c \quad (2.3.4)$$

设油滴密度为 ρ ，则

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \quad (2.3.5)$$

将式(2.3.4)代入式(2.3.5)，可以得到：

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_c}{2\rho g}} \quad (2.3.6)$$

但是，由于油滴并非刚体，并且其体积很小，以至于他们的线度可以与室温下空气分子的平均自由程相比较。所以，在此情况下，斯托克斯定律不严格成立，故对 η 作如下修正：

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{rP}} \quad (2.3.7)$$

其中， b 为修正常数且 $b = 8.23 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$ ， P 为实验时的大气压强。将式(2.3.6)、(2.3.7)代入式(2.3.5)中，可以得到：

$$m = \frac{4}{3} \pi \left[\frac{9 \eta v_c}{2 \rho g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{b}{rP}} \right]^{\frac{3}{2}} \rho \quad (2.3.8)$$

式中的 r 处在修正项中，无须十分准确，可以将式(2.3.6)直接代入，而式(2.3.8)中的 η, ρ, g, P, b 由实验室给出，这样以来测量油滴质量的问题便转化为油滴匀速运动时速度 v_c 的测量问题。

2. 匀速下降时速度 v_c 的测定: 在平衡力作用下，设油滴在平行板之间下降距离 l 所需时间为 t ，则：

$$v_c = \frac{l}{t} \quad (2.3.9)$$

将式 (2.3.8)、(2.3.9) 代入式 (2.3.2) 得

$$Q = \frac{18 \pi}{\sqrt{2 \rho g}} \left[\frac{\eta \cdot l}{t(1 + \frac{b}{rP})} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (2.3.10)$$

从上式可以看出，只要测出平衡电压 U 及匀速下降的距离 l 和所用的时间 t ，即可计算出油滴所带的电量 Q 。

[实验仪器]

OM99S型密立根油滴仪，油喷雾器等。

OM99S型密立根油滴仪外型如图2.3.2所示。主要部分——油滴盒的结构如图2.3.3所示。

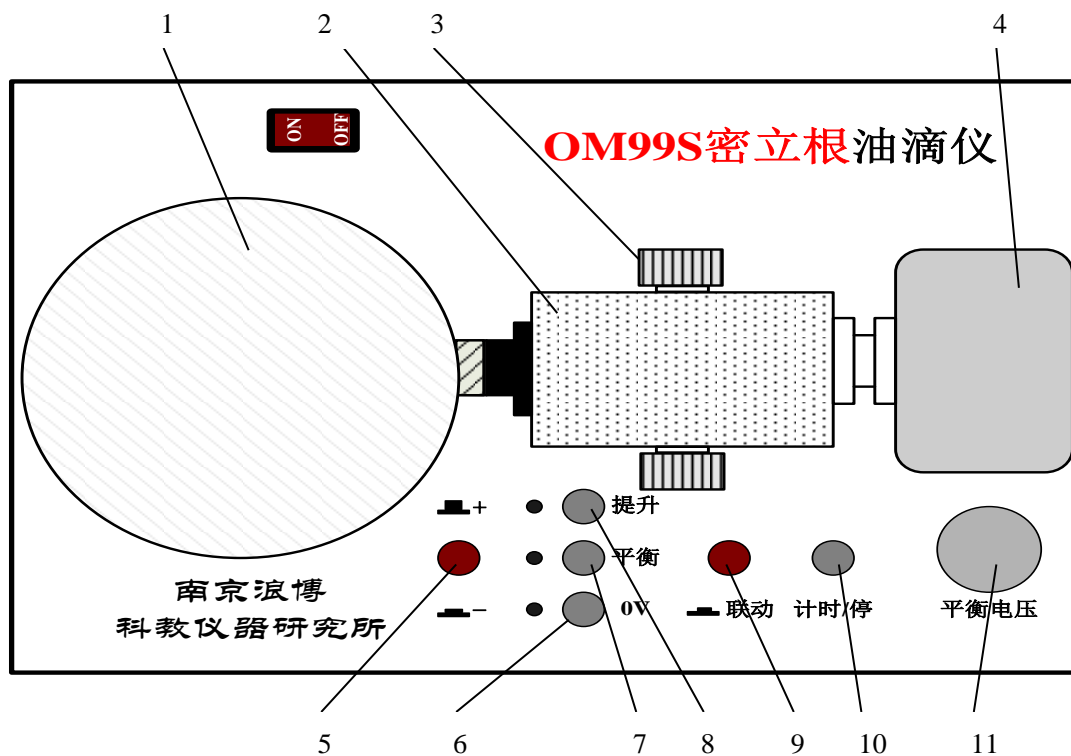


图 2.3.2 MOD-4型油滴仪

- | | | | |
|-------------|----------------|-------------|-----------|
| 1—油滴盒； | 2—测量显微镜； | 3—调焦手轮； | 4—CCD摄像头； |
| 5—电压极性切换开关； | 6—“0V”按键； | 7—“平衡”按键； | 8—“提升”按键； |
| 9—“联动”按键； | 10—秒表“计时/停”按键； | 11—平衡电压调节旋钮 | |

“电压极性切换”开关5可改变电场的方向：弹起状态时，上电极板带“+”电；压下状态时，上电极板带“-”电。当“0V”按键6压下时——指示灯亮起，两电极板被短接，此时平板间电场为零。“平衡”按键7压下时，两电极板之间存在电压，其值可由“平衡电压调节”旋钮11控制（调节范围0~400V），电压值显示在监视器右上角。“提升”按键8可以在平衡电压之外再给电极板附加一定电压，使油滴所受电场力增大，从而使其做上升运动。

操作中必须注意：使用“电压极性切换开关”5改变电场的方向前，一定要先使用“0V”按键6将两电极板电压置于0V，再做切换，以免损伤仪器。

当“联动”按键9处于弹起状态时，秒表“计时/停”按键10为手动秒表功能——需要按下开始计时、再按下停止计时；若“联动”按键9处于压下状态时，则已将秒表计时功能转移至“0V”按键6与“平衡”按键7的切换中了，此时无需再使用秒表“计时/停”按键10计时。秒表的计时结果显示在监视器的右上角。

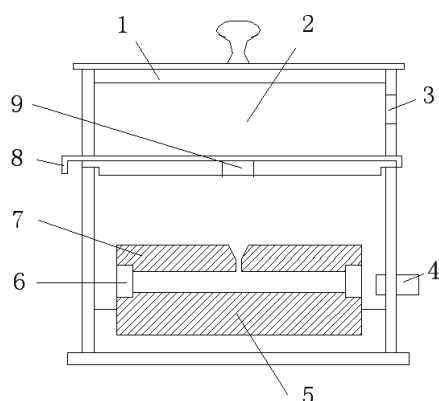


图2.3.3 油滴盒结构图

图 2.3.3 油滴盒结构图

- 1-上盖板 2-油雾室 3-喷雾口
4-上电极电源插孔 5-下电极板 6-胶木圆
7-上电极板 8-油雾孔开关 9-油雾孔

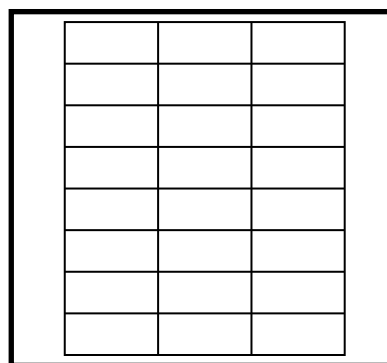


图 2.3.4 监视器视场

[实验操作]

1. 调整仪器

(1) 将仪器放平稳，调节底脚螺丝，使水准泡指示水平，这时，平行极板处于水平位置。

(2) 检查油雾器是否能正常——对着灯或亮处，快速而有力地挤压气囊，看是否能够喷射出油雾。油滴仪主机开机，几秒钟后监视器显示的视场如如图2.3.4所示。

(3) 用喷雾器将油滴从喷雾口喷入油雾室（喷一次即可），并微微调节显微镜的调焦手轮3，当视场中出现像夜空繁星一样的大量清晰的油滴像时，说明显微镜已调好了。

2. 练习选择油滴和控制油滴在电场中运动

(1) 按下“平衡”按键，在平行极板上加200V左右的电压（实验中“电压极性切换”开关弹起或者压下均可），跟踪其中的某一颗油滴，仔细调节“平衡电压调节”旋钮去控制“平衡电压”，到这一油滴静止不动为止。再按下“0V”按键，让油滴下降一段距离，重新加上“平衡电压”，使油滴静止。再按下“提升”按键使油滴上升。如此反复做多次练习，掌握控制油滴运动的技能。

(2) 为了测定油滴所带的电量，本实验只需测量“平衡电压” U 和油滴下落距离 l 所需的时间 t 这两个物理量即可。选定测量油滴下落的一段距离 l ，应在显微镜视场分划板中央区域较为合适。

(3) 选择合适的油滴是做好本实验的关键。因为选的油滴太大，油滴较亮，一般带电

量较多，下降速度快，测量结果不准确，选的油滴太小，则布朗运动明显，测量结果同样不准确，通常可选择“平衡电压” U 在100~300V左右，匀速下降1.5mm所用的时间在10~25s以内的油滴，其大小和带电量都比较合适。

3. 测量和记录数据

(1) “平衡电压” U 的测定，选定一颗油滴后，仔细调节平衡电压 U ，使油滴受力平衡。

(2) 当测出平衡电压后保持该电压不变，用“提升”按键将油滴移至视场中分划板第二刻度线处，然后按下“0V”按键，去掉“平衡电压” U ，油滴将下降，测出油滴经过分划板中间6格(一格为0.25mm，即 $l=1.5\text{mm}$)所需的时间 t ，测完 t 后，应随即按下“平衡”按键，加上“平衡电压” U ，以免油滴丢失。

(3) 对同一颗油滴进行8~10次测量，而且每次测量都要重新调节“平衡电压” U ，当油滴变得模糊时，要调节显微镜调焦手轮，跟踪油滴，切勿丢失。

(4) 清除测量室内所有油滴，按上面所述步骤，重新选择油滴进行实验。要求选择3~5颗合适的油滴进行测量。

4. 数据处理及要求

(1) 在式(2.3.1)中各恒量的值分别为：

油的密度	$\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
重力加速度	$g = 9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
空气粘度	$\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
油滴匀速下落距离	$l = 1.50 \times 10^{-3} \text{ m}$
修正常数	$b = 8.23 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$
大气压强	$P = 101325.02 \text{ Pa}$
平行板间距离	$d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

(2) 实验数据处理方法。我们对实验测得的各个电量 Q 求最大公约数，这个最大公约数就是基本电荷 e 的值。但是由于在实验中存在仪器误差和学生对实验测量不熟而产生的误差，要求出最大公约数比较困难。所以我们用“倒过来推证”的办法进行数据处理，也就是说用 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 去除实验测得的电量 Q ，然后四舍五入得到一个整数，这个数就是油滴所带基本电荷的数目 n ，再用 n 去除实验测得的电量 Q ，即得到基本电荷的实验测量值。

在本实验中，由于存在测量误差，使得 n 的测量值往往并不是基本电荷 e 的整数倍，由物质结构理论和统计理论可知，实验中获得的大部分油滴的电量 Q 值是在基本电荷 e 的整数倍附近涨落。因此可通过对大量油滴所带电量的测量值，用统计直方图来确定基本电荷 e 的值。

统计直方图：把等精度测量得到的 M 个结果 x_1, x_2, \dots, x_m 按一定区间 Δx 分组，统计出测量结果在区间 $\left(x - \frac{1}{2}\Delta x, x + \frac{1}{2}\Delta x\right)$ 内的次数 N ，或出现的频率 $f = N/M$ 。把 N 或 f 作为纵坐标， x 作为横坐标作出的图形为统计直方图。

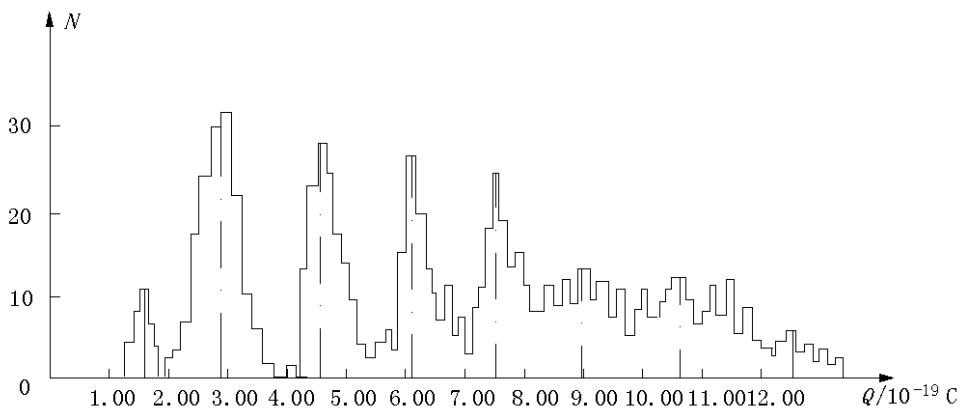


图2.3.5 油滴电量统计直方图

图 2.3.5 油滴电量统计直方图

我们对几百个油滴作 $Q \sim N$ 统计直方图，如图2.3.5所示，将油滴所带电量 Q 作为横坐标，每隔 $0.1 \times 10^{-19} \text{ C}$ 区间的油滴数 N 为纵坐标。由统计知识可知道：相邻两个峰的油滴所带电量的差值便是所测的基本电量。这样，可由逐差法确定 e 的值。在例图2.3.5中我们测得6个明显的峰，则隔三逐差：

$$\bar{e} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{Q_{i+3} - Q_i}{3}$$

式中 Q 为第 i 个统计峰值所对应的电量。

[思考题]

1. 密立根设计的油滴实验如何实现对基本电荷的测量？
2. 如何测油滴的电量？
3. 实验中若仪器没有调水平，对结果将会有何影响？
4. 本实验的数据是如何处理的？