

密立根油滴实验

电子电荷(元电荷)是物理学基本常量之一。通过油滴实验，密立根首次得到了电子电荷的精确值。同时，油滴实验还证实电荷分布是量子化的。由于元电荷测定及光电效应的贡献，密立根获得 1923 年诺贝尔物理学奖。本实验目的是测量元电荷，学习实验的设计思想。

实验原理

实验研究对象是带电的油滴，基本思想是使油滴处于受力平衡状态。油滴通过喷雾器喷射进入两块相距为 d 的平行极板之间。油在喷射撕裂成油滴时，一般都是带电的。调节两极板之间的电压 U ，可使油滴悬浮在空中，如图 1 所示。设油滴的质量为 m ，所带的电量为 q ，两极板间的电压为 U ，则油滴所受重力 mg ，静电力 $qE = qU/d$ 。

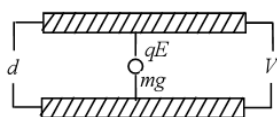


图 1 带电油滴受力图

油滴悬浮时，重力与电场力平衡（忽略空气浮力）

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

为了测出油滴所带的电量 q ，除了需测定平衡电压 U 和极板间距离 d 外，还需要测量油滴的质量 m 。这种测量电量的方法叫**静态平衡法**。

因 m 很小，难直接测量。油滴可视为球状，设密度为 ρ ，油滴的质量 m 可表示为

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

而油滴的半径 r 可通过其在重力场中的终极速度求出。平行极板不加电压时，油滴受重力作用而加速下降，由于空气阻力的作用，下降一段距离达到某一速度 v_g 后，阻力 f_r 与重力 mg 平衡，如图 2 所示，油滴将匀速下降。 v_g 称为终极速度。根据斯托克斯定律，阻力 $f_r = 6\pi r \eta v$ ，重力与阻力平衡时：

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

其中 η 是空气的粘滞系数， r 是油滴的半径。

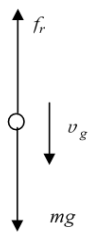


图2 油滴受力图 ($E = 0$)

由(2)式和(3)式得到油滴的半径

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

当两极板间的电压 U 为零时，设油滴匀速下降的距离为 l ，时间为 t_g ，则

$$v_g = \frac{l}{t_g} \quad (5)$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta}{2\rho g} \frac{l}{t_g}} \quad (6)$$

斯托克斯定律是以连续介质为前提的。对于半径为微米量级的油滴，空气已不能看作连续介质，空气的粘滞系数应作如下修正

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \quad (7)$$

其中 b 是修正常数， p 为大气压强。公式中包含油滴的半径 r ，但因为它处于修正项中，不需要十分精确，故它仍可以用(6)式计算。最后得到理论公式：

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

上式就是用静态平衡法测定油滴所带电荷的计算公式。其中，

电容器极板距离	$d = 5.00 \text{ mm}$
油的密度	$\rho = 981 \text{ kg/m}^3$
重力加速度	$g = 9.79 \text{ m/s}^2$
空气粘滞系数	$\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$
粘滞系数修正常数	$b = 0.00823 \text{ N/m}$
大气压强	$p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

油滴下落距离	$l = 1.6 \text{ mm}$
油滴半径	r (由公式 (6) 计算)
平衡电压	U (待测)
下落时间	t_g (待测)

实验仪器

油滴实验装置是油滴盒、油滴照明装置、调平系统、测量显微镜、供电电源以及电子停表、喷雾器等组成。其中油滴盒是由两块经过精磨的金属平板，中间垫以胶木圆环，构成的平行板电容器。在上板中心处有落油孔，使微小油滴可以进入电容器中间的电场空间，胶木圆环上有进光孔，观察孔。进入电场空间内的油滴由照明装置照明，油滴盒可通过调平螺旋调整水平，用水准仪检查。油滴盒防风罩前装有测量显微镜，并连接 CCD。

实验内容

1. 仪器调整

调节仪器面板上的三只平衡旋钮，将平行电极板调到水平。打开仪器和显示器开关，按“确认”键，选“平衡法”，进入测量界面。

2. 测量前的练习

(1) 熟悉操作按键。**按键 1**：计时开始/结束。**按键 2**：0 V/工作，电压在 0 V 和工作状态之间切换。**按键 3**：平衡/提升，工作电压可在平衡电压和提升电压之间切换，提升电压比平衡电压高约 200 V。

(2) 练习喷油和控制油滴平衡。用喷雾器向油滴盒内喷油，仔细调节“电压调节”旋钮，使油滴置于分划板上某条横线附近，以便准确判断出这颗油滴是否平衡了。

3. 正式测量

要做好本实验，很重要的一点是选择合适的油滴。选的油滴不能太大，大的油滴虽然比较亮，但一般带的电荷也比较多，下落时间也较短，结果不容易测准确。油滴也不能选得太小，太小则布朗运动明显，结果同样不容易测准确。因此，选取适中的油滴：目视直径~1 mm。

将按键 2 置于工作、按键 3 置于平衡、电压调至 200 V 左右。向油雾口喷油，调节显微镜旋钮，寻找移动缓慢的油滴，**缓慢旋转“电压调节”，使油滴处于悬浮状态**。记录此时的平

衡电压 U 。将按键 3 切换为“提升”，使油滴上升至顶部网格线，然后将按键 3 切换为“平衡”，使油滴悬浮。然后按下按键 2，使电压为“0 V”，油滴匀速下降。当下降到 0 格线时，迅速按下计时按钮，开始计时，待油滴下落至 1.6 mm 格线，停止计时。记下油滴下落时间 t_g 。

要求：1) 同一个油滴下落时间 t_g 测 **3 次**；2) 测 **5 个不同的油滴**。

4. 计算元电荷

a) 根据公式(6)和(8)，代入已知量，可以得到计算油滴电荷的简化公式：

$$q = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_g})t_g]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U}$$

据此计算油滴所带电荷 $q_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 。

b) 计算油滴所带元电荷个数 n_i 。得到每个油滴电量 q_i 后，用 e 的公认值 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 去除，**四舍五入取整**得到每个油滴携带的基本电荷个数 n_i 。油滴的元电荷 $e_i = q_i/n_i$ ，对 e_i 取平均，求得元电荷值 \bar{e} ，计算元电荷测量值与公认值的相对误差。

参考资料

1. Charge is quantized, Halliday *et al*, Principles of Physics (9th ed), chapter 21, pp. 570-571.
2. Measuring the elementary charge, Halliday *et al*, Principles of Physics (9th ed), chapter 22, p. 592.
3. 用密立根油滴实验测量电子电荷，吴泳华，霍剑青，浦其荣，大学物理实验（第一册 第二版），第 8 章，实验 8.1.1。
4. R. A. Millikan 1913, "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant", Phys. Rev. 32, 349. <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.2.109>

报告要求

实验名称

密立根油滴实验

实验目的

1. 验证电荷的不连续性，并测定元电荷的值。
2. 学习和理解密立根利用宏观量测量微观量的巧妙设想。

实验仪器

密立根油滴实验装置

实验原理

阅读实验讲义，重点弄清以下问题。

1. 实验的设计思想。油滴电荷为微观量，将其转换为宏观量测量。
2. 终极速度。油滴质量如何测量。

实验内容

见讲义，简要概括。

数据记录

表 1 油滴实验数据

油滴编号	U/V	t_{g1}/s	t_{g2}/s	t_{g3}/s	平均 t_g/s
1					
2					
3					
4					
5					

数据处理

1. 计算时间平均值。
2. 计算各油滴的电量 $q_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ ，参考以下简化公式。

$$q = \frac{1.022 \times 10^{-14}}{[(1 + 0.02193\sqrt{t_g})t_g]^{\frac{3}{2}}} \times \frac{1}{U}$$

3. 计算油滴所带元电荷个数 n_i 。得到每个油滴电量 q_i 后,用 e 的公认值 $1.602\times 10^{-19}\text{C}$ 去除,
四舍五入取整得到每个油滴携带的元电荷个数 n_i 。
4. 计算元电荷测量值、与公认值的相对误差。各元电荷 $e_i = q_i/n_i$,对 e_i 取平均得到 \bar{e} 。

注意: 要有数据代入过程。

实验结论

简要陈述实验目的,方法及结果。根据实验精度,元电荷结果保留3位有效数字即可。

实验讲义持续完善,本次更新时间:2025年1月。